



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA CHEMICKÁ**

FACULTY OF CHEMISTRY

**ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE**

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

**ORGANICKÉ MATERIÁLY PRO APLIKACE V  
BIOELEKTRONICE**

ORGANIC MATERIALS FOR BIOELECTRONIC APPLICATIONS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

David Bystřický

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.

BRNO 2019

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývala charakterizací organických polovodivých materiálů. Nejprve byly metodou termogravimetrie zjištěny teploty degradací. Dále byly pomocí diferenční skenovací kalorimetrie zjištěny změny v molekulách v závislosti na teplotě. Na závěr byly pomocí OFET charakterizací změřeny pohyblivosti nosičů náboje a jejich změny v závislosti na teplotě.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with characterisation of organic semiconductive materials. At first degradation temperatures were discovered by using thermogravimetric analysis. Then by using differential scanning calorimetry were discovered changes in molecules depending on temperature. In the end of this thesis by OFET characterisation charge carrier mobilities were measured and their dependence on temperature.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Organický tranzistor řízený polem, pohyblivost nosičů náboje, diketopyrrolopyrol, polovodivá vrstva, teplota

## **KEY WORDS**

Organic field effect transistor, charge carrier mobility, diketopyrrolopyrrole, semiconductive layer, temperature

BYSTRICKÝ, D. *Organické materiály pro aplikace v bioelektronice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 37 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D..

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....  
podpis studenta

## PODĚKOVÁNÍ

Velice bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Martinu Weiterovi Ph.D. za návrh tématu, vedení mojí práce, podání cenných rad a hlavně za čas, který mi věnoval při konzultacích, čtení práce a doplňování mých neznalostí, a bez kterého bych nebyl schopen práci dotáhnout do zdárného konce. Na závěr bych chtěl poděkovat Ing. Stanislavu Stříteskému za velkou oporu, pokoru a trpělivost, provázení laboratorní částí práce, naučení mě práce v laboratořích čistých prostor, pomoci s měřením, přípravu tranzistorů, zaslání velmi kvalitních učebních materiálů a spoustu dalších věcí, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

## Obsah

1.	Úvod .....	6
2.	Organické polovodiče .....	7
2.1.	Vazby v organických polovodičích .....	7
2.2.	Vodivost .....	7
2.3.	Materiály .....	8
2.3.1.	Diketopyrolopyroly (DPP) .....	8
3.	OFET – Organický tranzistor řízený polem .....	10
3.1.	Architektura .....	10
3.2.	Charakterizace .....	11
3.2.1.	Výstupní charakteristika .....	11
3.2.2.	Převodová charakteristika .....	11
3.3.	Pohyblivost nosičů náboje .....	12
3.3.1.	Faktory ovlivňující pohyblivost nosičů náboje .....	12
4.	Experimentální část .....	14
4.1.	Vybrané materiály a jejich příprava .....	14
4.2.	Příprava tenkých vrstev .....	15
4.2.1.	Vakuové napařování .....	15
4.2.2.	Rotační nanášení .....	15
4.3.	Charakterizace materiálu .....	16
4.3.1.	Termogravimetrie (TG) .....	16
4.3.2.	Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) .....	16
4.4.	Charakterizace tenkých vrstev .....	16
4.4.1.	Profilometrie .....	16
4.5.	Příprava OFETu .....	16
4.5.1.	Použitá architektura OFET .....	16
4.5.2.	Příprava substrátu .....	17
4.5.3.	Příprava vrstvy na OFET .....	18
4.6.	OFET charakterizace .....	18
4.6.1.	Aparatura .....	18
4.6.2.	Postup charakterizace OFETu .....	19
4.6.3.	Teploty měření tranzistoru .....	19
5.	Vyhodnocení a výsledky .....	20
5.1.	Výsledky profilometrie .....	20
5.2.	Výsledky termogravimetrie .....	20
5.3.	Výsledky diferenční skenovací kalorimetrie .....	21
5.3.1.	DPP 132 .....	21
5.3.2.	DPP 138 .....	22

5.3.3.	DPP 174.....	23
5.3.4.	DPP 178.....	23
5.4.	Výsledky OFET charakterizace .....	24
5.4.1.	DPP 132.....	24
5.4.2.	DPP 138.....	27
5.4.3.	DPP 174.....	29
5.4.4.	DPP 178.....	31
5.4.5.	Shrnutí .....	34
6.	Závěr .....	36
7.	Seznam zkratk.....	37
8.	Zdroje.....	38

## 1. Úvod

Organické polovodivé látky se čím dál častěji používají v elektronických součástkách, jako jsou například tranzistory. Je to díky jejich nízkým nákladům a jednoduchosti přípravy. Zároveň se dají modifikovat přesně pro aplikace, na které budou využívány. Z těchto důvodů se začínají postupně upřednostňovat před svými anorganickými kolegy. [9] V současné době se dá v podstatě říct, že už nenajdete mobilní telefon bez organiky. Právě kvůli jejich zvyšujícímu se využití byly tyto materiály zkoumány.

Stěžejní parametr organických polovodičů je pohyblivost nosičů náboje. S vývojem nových technik přípravy a nových polykrystalických a monokrystalických polovodivých materiálů se tento parametr neustále zvyšuje. [10]

V rámci práce je rozebrána problematika organických polovodivých látek s hlavním zaměřením na organický tranzistor řízený polem (OFET). V rámci OFETu je největší důraz kladen na pohyblivost nosičů náboje a faktory, které ji ovlivňují. Dále je pojednáno o metodách využívaných pro charakterizaci vlastností materiálu v závislosti na teplotě a o metodách, které se využívají k charakterizaci právě pohyblivosti nosičů náboje.

## 2. Organické polovodiče

Organické polovodiče jsou založené na atomech uhlíku. Tyto atomy jsou spojeny jednoduchými a dvojnými vazbami. Vazby se v molekulách organických polovodičů střídají, aby vznikl konjugovaný systém. Konjugované systémy vedou k elektrické vodivosti organických polovodičů. V organických polovodičích dochází k hybridizaci s a p orbitalů za vzniku  $3sp^2$  hybridizovaných orbitalů, které mezi sebou svírají úhel  $120^\circ$  a jsou drženy silnou  $\sigma$  vazbou. Čtvrtý ( $p_z$ ) orbital je kolmý na rovinu atomů. Přesah tohoto orbitalu vede ke vzniku delokalizované  $\pi$  vazby, která je zodpovědná za polovodivé vlastnosti materiálů. [1]

Oproti  $\sigma$ -vazbám, které tvoří kostru molekuly, jsou  $\pi$ -vazby mnohem slabší. V důsledku toho dochází k nejnižší elektrické excitaci právě na spojení  $\pi$ -vazeb s energií vazby typicky mezi 1,5-3 eV. [2] [3]

Snížení energie systému, které je dáno jeho nesymetrií, vede ke vzniku dvou energetických hladin HOMO (nejvýše obsazený molekulový orbital - highest occupied molecular orbital) a LUMO (nejnižší neobsazený molekulový orbital - lowest unoccupied molecular orbital). Tyto dvě hladiny jsou od sebe odděleny energetickým pásem, kdy energie nutná k jeho překonání je dána strukturou materiálu. Dále tato energie klesá s narůstajícím počtem stejných jednotek. [1]

Na základě struktury se jejich molekul dají rozdělit na látky nízkomolekulární (látky o nízké molekulové hmotnosti) a polymerní (látky o vysoké molekulové hmotnosti). Obě tyto skupiny látek mají, jak bylo zmíněno výše, konjugovaný  $\pi$ -elektronový systém. [2] [3]

### 2.1. Vazby v organických polovodičích

Oproti anorganickým polovodičům jsou molekuly organických krystalů spojeny van der Waalsovými vazbami a často také vodíkovými můstky. [4]

Důsledkem těchto slabých interakcí je výrazně slabší spojení než u polovodičů anorganických, které je tvořeno kovalentními vazbami. Celkově to má vliv na fyzikální vlastnosti jako je nižší bod tání nebo menší tvrdost. [2] [4]

Důležitějším výsledkem ovšem je mnohem silnější lokalizace vlnových funkcí elektronů mezi sousedními molekulami, což ovlivňuje optické vlastnosti a přenos náboje. Z této slabé delokalizace vyplývají dvě základní specifika, které mají organické polovodiče oproti polovodičům anorganickým. [2] [4]

První specifikum vyplývající ze slabé delokalizace je existence dvou spinových stavů, singletu a tripletu, stejně jako v izolovaných molekulách. Tyto spinové stavy jsou odvozeny z kvantové mechaniky (konkrétně z multiplicity). Singletový stav je odpovědný za fluorescenci a tripletový za fosforescenci. [2] [5]

Druhé specifikum je obvyklá přítomnost excitovaných stavů v molekule, které mají značnou vazebnou energii (mezi 0,5 a 1 eV). [2] [5]

Po excitaci elektronu z valenčního do vodivostního pásu je excitovaný elektron vázán coulombickými silami ke vzniklé díře a tento lokalizovaný pár (exciton) tedy neslouží jako nosič náboje. Příkladem toho je nutnost překonání této vazebné energie ve fotovoltaických článcích, aby došlo ke vzniku páru nezávislého kladného a záporného nosiče náboje. [2] [5]

### 2.2. Vodivost

Vodivost u organických materiálů je odlišná oproti klasickým vodičům. Blíží se vodivosti nevlastních anorganických polovodičů, která je dána dopováním příměsí do materiálu. [6]

Existují dva typy dopování – p dopování a n dopování. Způsob dopování určí, jaký nosič náboje je dominantní. Nelze určit veškeré částice, které se účastní přenosu náboje. Z tohoto důvodů jsou organické látky velice náchylné na kontaminaci při přípravě. Liší se také chemická stabilita po deponování. Tyto okolnosti ztěžují dosažení stejných vlastností u vzorků a znemožňují přesný popis nosičů náboje. [6]

Pro *p* dopování se používají prvky a sloučeniny s vysokou elektronovou afinitou. Tím se připojí elektron ze struktury molekuly a vznikne náboj v podobě elektron díry. Pro *n* dopování se oproti tomu používají sloučeniny s nízkou elektronovou afinitou. Díky tomu je v materiálu více valenčních elektronů než materiál potřebuje. [6]

Další vznik nosičů náboje (elektronů a děr) může dále probíhat dále například excitací elektronu dodáním energie absorpce fotonu, zvýšením tepla, elektrickým polem. Samotný pohyb těchto nosičů probíhá třemi způsoby. Zprv se jedná o pohyb náboje podél konjugovaného řetězce, druhý mechanismus je přeskok mezi jednotlivými řetězci a třetí je přeskok mezi více a méně vodivými částmi molekuly. [7]

### 2.3. Materiály

Zásadní vlastnosti určující výkon elektronických součástek, jsou parametry použitých materiálů. V současné době jsou tendence hledat nové látky s danými vlastnostmi pro aplikace, ve kterých budou uplatňovány – například vysoká pohyblivost, fluorescence, vysoký molární absorpční koeficient. [8]

Mimo konjugovaných polymerů (například poly (3 – hexylthiofen), TCQN, poly (*p* – fenylene vinylen)) se začíná klást důraz i syntetické nízkomolekulární materiály s konjugovaným systémem, ve kterém se velmi často objevují atomy dusíku, kyslíku, halogenu, či případně kovu jako centrálního atomu v komplexu. [8] [9]

OFETs, kde se jako aktivní látka používá rubren, vykazují (zatím) nejvyšší pohyblivostí nosičů náboje ( $20 - 40 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ ). [9] [10]

Další často využívaná aktivní látka je pentacen (používá se již od roku 1980). Pohyblivost nosičů náboje je u pentacenu mnohem nižší než u rubrenu (zhruba desetkrát). Z toho důvodu nemá perspektivu do budoucna. Další jeho problém (podobně jako u dalších organických polovodičů) je rychlost oxidace na vzduchu. Při oxidaci pentacenu vzniká pentacenchinon. Ten se dá ovšem dobře využít jako izolant elektrod. Proto se nechává pentacen předoxidovat. Tato oxidace je podobná oxidaci křemíku na oxid křemičitý, který se dá v organických tranzistorech použít jako substrát. [9] [10]

#### 2.3.1. Diketopyrolopyroly (DPP)

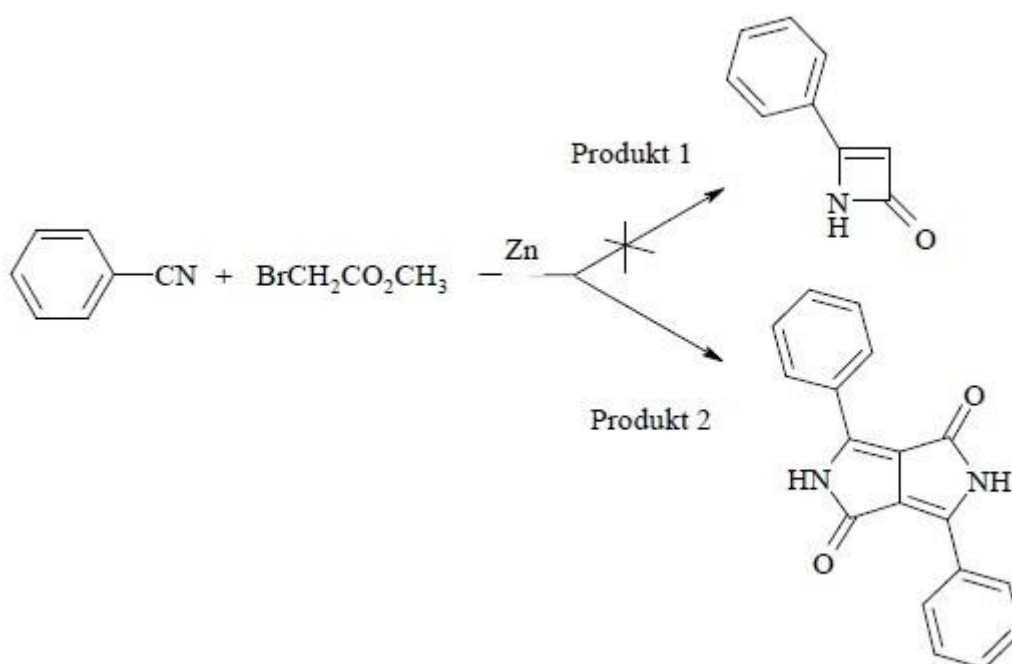
Sloučenina 1,4-diketo-3,6-difenyl-pyrol-3,4-c-pyrol (DPP) byla poprvé připravena roku 1974. K syntéze DPP došlo při syntéze laktamu, kdy laktam měl být produktem reakce (obrázek 1). [8]

DPP je v pevném stavu červená, velice stabilní a velmi málo rozpustná látka. Po rozpuštění nabývá žlutý, lehce nazelenalý, průhledný roztok.

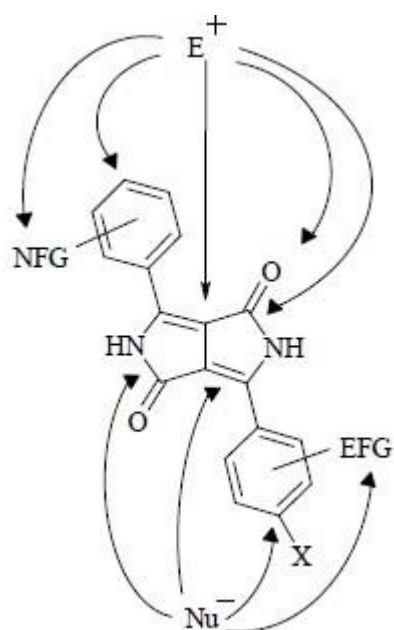
Syntéza derivátů substituovaných na aromatické jádro je možná při použití aromatických nebo heterocyklických derivátů benzonitrilu. Mimo aromatické jádro se dají použít nukleofilní či elektrofilní substituce. [11] Pomocí polárních substituentů je možné způsobit přerozdělení elektronové hustoty, čímž se dají významně ovlivnit i absorpční a fluorescenční vlastnosti. [12]

DPP má celou řadu uplatnění. Kromě vysoké stability pigmentu při barvení vysokomolekulárních látek se DPP používá u přípravy fotoluminiscenčních barviv. Díky svým vlastnostem má DPP a jeho deriváty své místo i v elektronice. Koncem 80. let 20. století byla u DPP pigmentů poprvé popsána děrová vodivost. Tato děrová vodivost se pohybovala v rozmezích  $10^{-7}$  až  $10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ . Později se objevily i deriváty s vodivostí až  $0,7 \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ . [14]





**Obrázek 1** Schéma syntézy laktamu a DPP



**Obrázek 2** Schéma možných reakčních center na struktuře DPP[13]

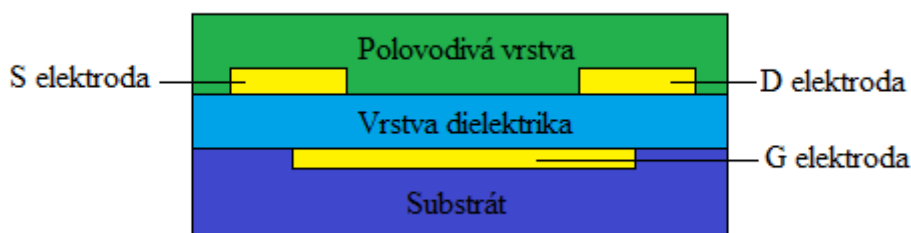
### 3. OFET – Organický tranzistor řízený polem

Jedná se o tranzistor vedoucí proud, který je regulován elektrickým polem. Toto pole působí kolmo na protékající proud. Proud je v této součástce veden polovodičovým materiálem. Nosiči proudu jsou zde elektrony a díry. [15] Většina OFETs je založena na vodivosti typu P. Tranzistory s vodivostí typu N nebyly dosud dostatečně studovány. Z tohoto důvodu tranzistory s vodivostí typu N nedosahují takové výsledky jako u typu P. [16]

#### 3.1. Architektura

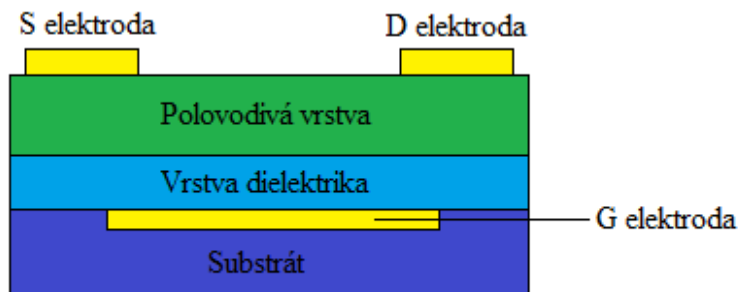
Tranzistor se skládá ze třech elektrod – S (source – zdrojová), D (drain – odtoková), G (gate – řídící). S a D elektrody jsou v přímém kontaktu s polovodičovým materiálem, díky čemuž mezi nimi dochází k tvorbě vodivého kanálu, zatím co elektroda G je od nich oddělena tenkou vrstvou dielektrika (např.  $\text{SiO}_2$ , ohebný plast) a je umístěna tak, aby bylo elektrické pole kolmé na procházející proud. Krom elektrod je další součástí tranzistoru substrát (nejčastěji oxid křemičitý) a již více zmiňované dielektrikum.

OFETs se vyrábí v různých tvarech a strukturách. Nejčastější struktura je, kdy je G elektroda umístěna ve spod struktuře (ale na substrátu), na ní je nanesena vrstva vhodného izolantu a na izolantu jsou naneseny elektrody S a D. S a D elektrody bývají nejčastěji tvořeny zlatem, dá se ale použít i organický materiál, což nebývá příliš obvyklé. Tento typ struktury je blízký struktuře TFT tranzistoru (Thin Film Transistor – tenkovrstvý tranzistor) a nazývá se bottom contact - s dolními kontakty (obrázek 3). [17] [18] [19]



**Obrázek 3** Schéma tranzistoru s dolními kontakty

Další způsob architektury tranzistoru se nazývá top contact - s horními kontakty. Jedná se o v podstatě stejné zapojení jako u tranzistoru s dolními kontakty s tím rozdílem, že S a D elektroda jsou v tomto případě naneseny až na vrstvě polovodičového materiálu (obrázek 4). [19]



**Obrázek 4** Schéma tranzistoru s horními kontakty

Proud ve vodivém kanálu mezi zdrojovou elektrodou a odvodovou elektrodou může být upraven napětím na řídící elektrodě pomocí efektu dopování elektrickým polem (proto tranzistor řízený polem). Nosiče náboje u OFET mají menší pohyblivost než nosiče u FET. Na

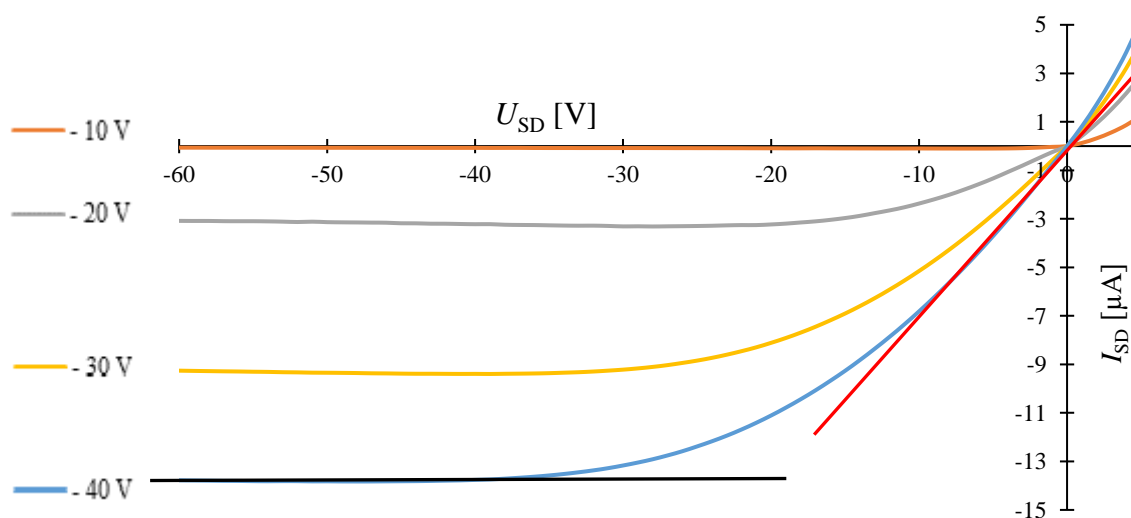
druhou stranu jsou oproti FETs výhodnější v ceně, ohebnosti, biokompatibilitě a ploše. Z tohoto důvodu se OFETs využívají převážně jako jednorázové senzory. [17]

### 3.2. Charakterizace

Charakterizace OFETů je odvozena od anorganických FET tranzistorů. Jedná se o voltampérové charakteristiky u unipolárních tranzistorů řízených elektrickým proudem. Typické jsou výstupní a převodové charakteristiky. Obě tyto charakteristiky spadají do kategorie statických charakteristik. [20]

#### 3.2.1. Výstupní charakteristika

Na obrázku 5 je vyobrazena závislost proudu mezi S a D elektrodou v závislosti na přiloženém napětí mezi těmito elektrodami. Pro OFETy je typické, že při zvýšení (nebo zmenšení) elektrického pole na G elektrodě, dojde ke zvýšení či snížení procházejícího proudu. Chování zobrazené na Obrázku 5 je charakteristické pro OFETy s vodičem typu P. Pro vodiče typu N je charakteristika podobná, ale má charakteristiku pro kladné  $U_{SD}$ , kladné  $U_G$  a tedy i kladný proud (graf vypadá stejně, ale je otočen do třetího kvadrantu). [20]



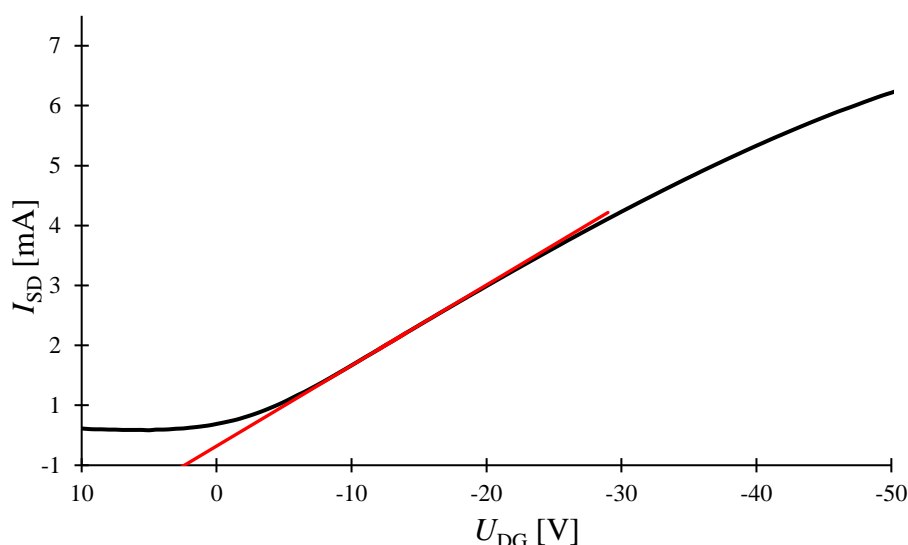
**Obrázek 5** Příklad výstupní charakteristiky OFETu

Tato charakteristika má dvě oblasti. První je oblast tvořená lineárním nárůstem proudu při zvyšujícím se napětí (na obrázku 5 je zobrazena červenou přímkou) a nazývá se lineární (ohmická) oblast. Druhá část grafu je ta, kde se proud se zvyšujícím se napětí nemění (na obrázku 5 je označena černou přímkou). Tato oblast se nazývá saturační neboli oblast nasycení.

Výstupní charakteristika patří mezi charakteristiky statické, a proto by neměla být ovlivněna dynamickými vlastnostmi OFETu. [20]

#### 3.2.2. Převodová charakteristika

Převodová charakteristika je závislost proudu mezi S a D elektrodou na napětí mezi G a D elektrodou za konstantního napětí mezi S a D elektrodou (obrázek 6). Z této charakteristiky se dají vyčíst nebo pomocí ní vypočítat důležité veličiny pro charakterizaci tranzistoru jako je prahové napětí nebo pohyblivost nosičů náboje (kapitola 3.3.) [20]



**Obrázek 6** Příklad převodové charakteristiky OFETu

Přímka v obrázku zobrazuje místo, kde derivace  $\partial I_{DS}/\partial U_{DG}$  nabývá nejvyšších hodnot. Hodnota, kde tato přímka protíná osu x je tzv. prahové napětí. Směrnice této křivky se na druhou stranu využívá k výpočtu pohyblivosti nosičů náboje (kapitola 3.3.). [20]

### 3.3. Pohyblivost nosičů náboje

Pohyblivost nosiče náboje v polovodičovém materiálu je určující parametr pro moderní elektronická zařízení, která využívají transport náboje v hlavním pracovním procesu. [10] Je definována jako vzdálenost, přes kterou jsou nosiče náboje přeneseny za jednu sekundu a pod jednotkovým elektrickým polem. Toto je vyjádřeno rovnicí  $\mu = \frac{v}{F}$  (1), kde  $\mu$  je driftová pohyblivost nosičů náboje,  $v$  je rychlost nosičů náboje a  $F$  je síla elektrického pole. [20]

Z důvodu nízkých pohyblivostí u organických materiálů, je nutno optimalizovat výpočet i měření. Vzorce pro výpočty mobility nosičů náboje se dělí do dvou skupin. První je skupina pro výpočet pohyblivosti v lineární oblasti, která je dána rovnicí  $\mu_{sat} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_G} \cdot \frac{L}{W \cdot C_i \cdot V_{DS}}$  (2). Druhá skupina je tedy pro výpočty pohyblivosti v oblasti satureace a je dána

rovnicí  $\mu_{sat} = \left( \frac{\partial I_{DS}^{1/2}}{\partial V_G} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot L}{W \cdot C_i}$  (3). [10] [20]

#### 3.3.1. Faktory ovlivňující pohyblivost nosičů náboje

Efektivní transport náboje vyžaduje, aby se byly náboje schopny pohybovat od molekuly k molekule a nebyly zachyceny nebo rozptýleny. Z tohoto důvodu je pohyblivost nosičů náboje ovlivněna několika faktory, jako je například molekulární uspořádání, neuspořádání, přítomnost nečistot, teplota, elektrické pole, hustota nosičů náboje, velikost/molekulová hmotnost a tlak. [23]

Co se týče molekulárního uspořádání, anizotropie přenosu náboje v monokrystalech ukazuje, že efektivita přenosu náboje je úzce spojena s relativní pozicí interagujících molekul. Ve většině případů  $\pi$  – konjugované molekuly krystalizují do vrstveného stromečkového uspořádání. Takové uspořádání vyvolává 2D transport v rámci skládaných vrstev, zatímco transport mezi vrstvami je méně efektivní. Stromečkové uspořádání ovšem nemusí být nejvhodnější uspořádání pro přenos, kvůli velikosti úhlu mezi rovinami sousedních molekul napříč stromečkovou strukturou (což redukuje sílu mezimolekulárních interakcí). Z těchto

důvodů byly pokusy připravit kofaciální konjugované struktury (lépe vodivé krystalové struktury). Bohužel se v současné době nedá teoreticky vymodelovat daná struktura (jak bude vypadat), protože kvantová chemie a molekulární mechanika ještě nejsou ve stádiu, kdy by se dalo krystalové uspořádání (i malých molekul) přesně určit. Každopádně zatím nejsou jasné důkazy, kdy by kofaciální uspořádání, kterých lze experimentálně dosáhnout, vykazovaly vyšší pohyblivosti než stromečkové uspořádání. [23]

Závislost na teplotě je různá u monokrystalech a neuspořádaných materiálech. V monokrystalech pohyblivost nosičů náboje klesá s rostoucí teplotou. Měření pohyblivosti na monokrystalech ukazují, že při nízkých teplotách (kolem 10 K) mohou pohyblivosti nosičů náboje dosahovat až několik stovek  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pohyblivosti v monokrystalech se také mohou rapidně snížit při ochlazení pod kritickou teplotu. Takový propad většinou odráží přítomnost pastí, které také snižují anizotropii pohyblivosti. Ve vysoce neuspořádaných systémech přenos obvykle probíhá přeskokováním a bývá termicky aktivován. Vyšší teploty zlepšují přenos poskytnutím energie, která je potřebná pro překonání bariér, které jsou vytvořeny energetickým neuspořádáním. [23]

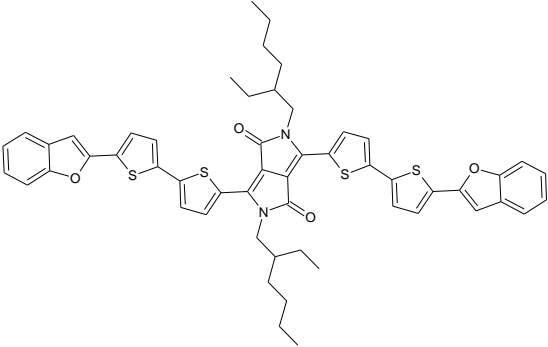
## 4. Experimentální část

### 4.1. Vybrané materiály a jejich příprava

Všechny materiály použité pro charakterizaci patří do skupiny diketopyrrolopyrolů (DPP). Byly připraveny skupinou COC Ltd. v Pardubicích.

**Tabulka 1** Tabulka materiálů použitých k charakterizaci

Systematický název		
Materiál	Označení	Struktura
3,6-bis (5-(benzofuran-2-yl) thiofen-2-yl)-2,5-bis (2-ethylhexyl) pyrolo [3,4-c] pyrol-1,4 (2H, 5H)-dion		
DPP(TBFu) <sub>2</sub>	132	
3,6-bis (5-(5-(benzofuran-2-yl) 1,3-thiazol-2-yl) thiofen-2-yl)-2,5-bis (2-ethylhexyl) pyrolo [3,4-c] pyrol-1,4 (2H, 5H)-dion		
DPP(TTaBFu) <sub>2</sub>	138	
3,6-bis (5-(4-hexyl-5-(benzofuran-2-yl) thiofen-2-yl) thiofen-2-yl)-2,5-bis (2-ethylhexyl) pyrolo [3,4-c] pyrol-1,4 (2H, 5H)-dion		
DPP(THexTBFu) <sub>2</sub>	174	

3,6-bis (5-(5-(benzofuran-2-yl) thiofen-2-yl) thiofen-2-yl)-2,5-bis (2-ethylhexyl) pyrolo [3,4-c] pyrol-1,4 (2H, 5H)-dion		
DPP(TTBFu) <sub>2</sub>	178	

Před přípravou tenkých vrstev bylo nutné materiály rozpustit. Šlo pouze o materiály, ze kterých byla vrstva připravena metodou rotačního nanášení (popsáno v kapitole 4.2.2.). Materiály pro přípravu metodou vakuového napařování (popsána v kapitole 4.2.1.) nevyžadují žádné úpravy (vzorek v práškové formě se zahřívá a sublimuje).

Jako rozpouštědlo byl použit chloroform. Aby byl materiál dokonale rozpuštěn, byla volena koncentrace materiálu v chloroformu 15 mg/ml. Dále byl pro lepší rozpuštění roztok materiálu v chloroformu zahříván na 60 °C. Na závěr byl pro odstranění přebytečných nečistot roztok přefiltrován přes PTFE (polytetrafluorethylen) membránu s velikostí pórů 0,45 µm.

## 4.2. Příprava tenkých vrstev

Příprava (nanášení) polovodivých vrstev je zásadní krok při zhotovování tranzistoru. Podle charakteru materiálu se volí vhodný způsob nanášení. Malé molekuly bývají nanášeny ve formě roztoků, nebo jako pevné látky.

V našem případě bylo použito vakuového napařování, při kterém se pevná látka za vysoké teploty vypařuje, a rotačního nanášení, kdy je nutno nejprve vzorek rozpustit ve vhodném rozpouštědle.

### 4.2.1. Vakuové napařování

Napařování probíhá ve vakuové napařovací komoře. Studovaný materiál se vloží do žíhacího kelímku (musí být čistý, aby nedocházelo k napařování nečistot), který je následně zahříván. Po začátku depozice (okamžik, kdy je na materiál zahřát na takovou teplotu, že začne sublimovat) materiál přechází do plynné fáze a následně kondenzuje na substrátu, který je umístěn v držáku nad kelímkem, čímž se začíná tvořit tenká vrstva studovaného materiálu.

Výhodami vakuového napařování je schopnost jednoduše regulovat rychlost depozice a tloušťku vrstvy.

### 4.2.2. Rotační nanášení

Jsou dvě metody rotačního nanášení – statická a dynamická. V obou případech je nezbytné nejprve vzorek rozpustit ve vhodném rozpouštědle (popsáno v kapitole 4.1.2.). Pokud nedojde k úplnému rozpuštění, je nutno rozpuštěný vzorek nejprve přefiltrovat, což může mít za následek změnu koncentrace.

Statická metoda spočívá v nanesení malého množství vzorku na substrát, který je upevněn na disku rotačního nanášeče – přístroj s rotujícím diskem a s nastavitelnou rychlostí otáček disku. Ihned po nanesení roztoku (před zapnutím rotačního nanášeče) dochází k okamžitému odparu rozpouštědla, což silně ovlivňuje výslednou morfologii vrstvy. Poté dojde k roztočení disku, díky čemuž se vzorek rovnoměrně rozprostře po substrátu.

Dynamická metoda probíhá v podstatě stejně jako metoda statická, s tím rozdílem, že se nejprve disk rotačního nanášeče roztočí a až poté se na rotující substrát nanáší vzorek. Výhodou

oproti statické metodě je fakt, že při dynamické metodě nedochází k odparu rozpouštědla (jako tomu je u statické metody) a je tedy lepší pro reprodukovatelnost tenkých vrstev

Výhodou obou metod je schopnost dobře řídit tloušťku vrstvy, a zároveň tyto metody umožňují tvorbu kvalitních homogenních vrstev.

### **4.3. Charakteritace materiálu**

Pro charakterizaci materiálu byly použity metody termické analýzy – termogravimetrie a diferenční skenovací kalorimetrie. Při obou těchto metodách byl jako objekt měření použit surový materiál.

#### **4.3.1. Termogravimetrie (TG)**

Termogravimetrie je jedna z metod termické analýzy – jedná se o dynamickou metodu. Princip metody spočívá v měření změn hmotnosti vzorku při jeho zahřívání nebo ochlazování nebo změnu hmotnosti v závislosti na čase. Jejím výsledkem je termogravimetrická křivka, která znázorňuje onu závislost hmotnosti na teplotě (nebo čase). Dají se z ní odečíst teploty, při kterých dochází ke hmotnostním změnám. Tato metoda se využívá například k určení teplotní stability sledovaného materiálu. [21]

#### **4.3.2. Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)**

U diferenční skenovací kalorimetrie (další metoda termické analýzy) jsou pozorovány změny fyzikálních a chemických vlastností při ohřívání a chlazení. Principiálně jde o dva vyhřívané termostaty, kdy v jednom z nich je měřený vzorek a ve druhém je prázdná miska sloužící jako reference. Když se ve vzorku neodehrávají žádné změny, je teplota obou termostatů stejná. Jakmile začne ve vzorku docházet ke změnám teploty – vzorek buď teplo spotřebovává nebo uvolňuje – dojde k narušení rovnovážných podmínek. Výsledkem je tepelný tok v závislosti na čase. [22] Výstupem měření je graf závislosti tepelného toku na teplotě.

### **4.4. Charakterizace tenkých vrstev**

Aby mohly být vrstvy charakterizovány, bylo nutné při přípravě tenkých vrstev na OFET substrát také připravit tenké vrstvy na podložní sklo o rozměrech 15 na 15 mm. Tato příprava probíhala v případě vakuového napařování souběžně s přípravou na substrát a v případě rotačního nanášení bylo použito stejného vzorku, otáček i postupu, aby bylo docíleno stejné tloušťky a morfologie vrstvy jako na OFET substrátu.

Na těchto připravených podložních sklech byly prováděny následující charakterizace.

#### **4.4.1. Profilometrie**

Profilometrie je metoda umožňující analýzu povrchu. Její pomocí se dá zjistit tloušťka nanášené tenké vrstvy.

U mechanického profilometru dochází ke kontaktu hrotu s vrstvou. Nastaví se dráha hrotu, která zpravidla začíná, končí nebo prochází místem, kde není vrstva a prochází místem, kde se daná vrstva nachází. Dále se nastaví tlak hrotu na vzorek. Po nastavení dráhy a tlaku se spustí program, který snímá vertikální pohyb hrotu. Výsledkem je graf, kde je na ose x vynesena změřená vzdálenost a kde je na ose y výška.

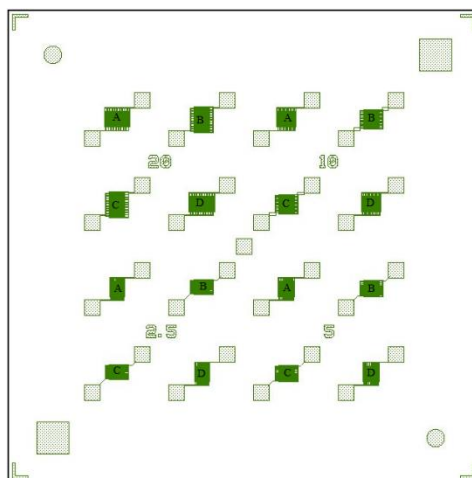
### **4.5. Příprava OFETu**

#### **4.5.1. Použitá architektura OFET**

Jednalo se o substrát o velikosti 15 x 15 mm s 16 tranzistory a jednou společnou gate elektrodou. Tyto tranzistory mají šestnáct párů kontaktovacích elektrod pro nakontaktování hrotů měřící aparatury. Každé čtyři tranzistory mají stejnou délku kanálu – délka kanálu je zapsána vždy mezi příslušnými elektrodami. V tomto případě měly kanály délku 2,5; 5; 10 a 20  $\mu\text{m}$ . Šířka kanálu je 30  $\mu\text{m}$ . Pro přesné označení se pro každý kanál krom délky určovala i

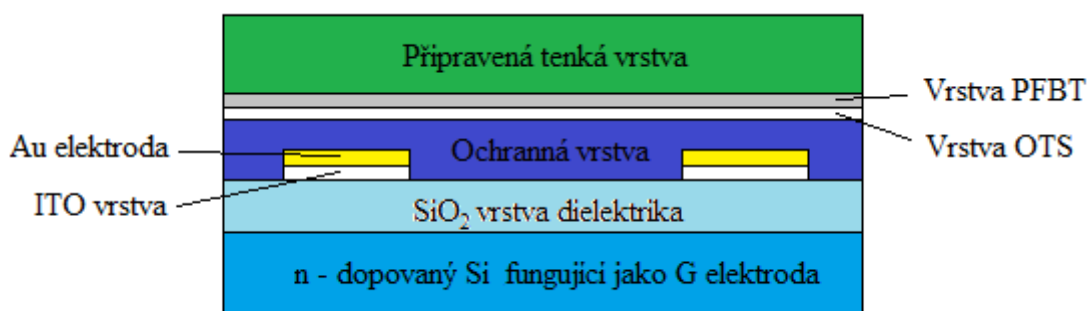


poloha – A, B, C nebo D (pro každou délku kanálu). Jednalo se však pouze o rozlišující označení (mezi jednotlivými polohami by neměl být žádný rozdíl). Rozložení elektrod (horní pohled) je zobrazeno na obrázku 7.



**Obrázek 7** Schéma komerčního tranzistoru

Boční pohled na architekturu připraveného tranzistoru je zobrazen na obrázku 8. Schéma zobrazuje jeden pár zlatých, kontaktovacích elektrod, které se nachází pod ochrannou vrstvou, která slouží proti poškození elektrod. Pod elektrodami se nachází 10 nm široká, vodivá vrstva ITO (oxid india a cínu). Tloušťka dielektrika, která je tvořena oxidem siřičitým ( $\text{SiO}_2$ ), je v tomto případě 230 nm. Tloušťka polovodivé vrstvy, která je nanесena na ochranné vrstvě, byla volena 100 nm. Tato tloušťka se ovšem pro jednotlivé tranzistory lišila. Popis měření přesné tloušťky vrstvy je popsán v kapitole 4.4.1. Na spodu tranzistoru se nachází n – dopovaná vrstva křemíku, která slouží jako G elektroda.



**Obrázek 8** Boční schéma připraveného tranzistoru

#### 4.5.2. Příprava substrátu

Příprava substrátu na nanášení vrstvy probíhala ve dvou krocích. Nejprve bylo nutno očistit substráty, aby byly zbaveny veškerých nečistot. Druhý krok byla příprava aktivní vrstvy na nanášení.

Čištění bylo prováděno kvůli tomu, že jakékoliv (i velmi drobné) nečistoty mohou mít značný vliv na funkčnost tranzistoru, což by mohlo mít za následek zkreslení výsledků. Celé čištění bylo prováděno v ultrazvukové čističce za laboratorní teploty a maximálního výkonu

čističky. Celý proces začal čištěním v acetonu, následovala aktivace vrstvy z oxidu křemičitého pomocí lázně hydroxidu sodného (2%), zakončené čištěním v izopropanolu a konečným usušením.

Proces přípravy vrstvy na nanášení probíhal v glove boxu, aby atmosféra obsahovala co nejmenší množství vody (a kyslíku). Substrát byl ponořen do roztoku OTS (octadecyltrichlorsilan) v toluenu s koncentrací  $10 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ , kde byl za zahřívání při teplotě  $70^\circ\text{C}$  hodinu a půl. Vyndán, opláchnut v isopropanolu a ofouknut dusíkem. Následně byl substrát přenesen do roztoku PFBT (poly-fluorenbenzothiadiazol) v toluenu s koncentrací  $5 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Zde byl za pokojové teploty zahříván po dobu pěti minut.

Po dokončení procesu byl substrát vyjmut z roztoku, opláchnut isopropanolem a usušen.

#### 4.5.3. Příprava vrstvy na OFET

Způsoby nanesení tenké vrstvy na substrát jsou popsány v kapitole 4.2. Způsoby přípravy vrstvy pro jednotlivé materiály jsou vypsány v tabulce 2.

**Tabulka 2** *Souhrn metod příprav tenkých vrstev pro jednotlivé materiály*

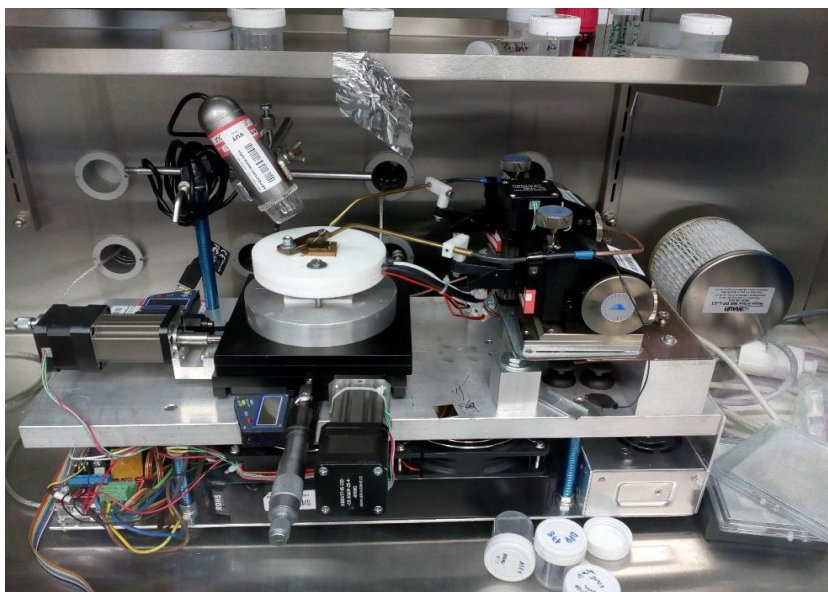
Materiál	Metoda přípravy vrstvy
DPP 132	Vakuové napařování
DPP 138	Vakuové napařování
DPP 174	Rotační nanášení
	Vakuové napařování
DPP 178	Vakuové napařování

Vrstva z materiálu DPP 174, která byla připravena metodou vakuového napařování nebyla funkční, a proto nebude dále zmiňována.

### 4.6. OFET charakterizace

#### 4.6.1. Aparatura

Charakterizace tranzistoru probíhala v glove boxu s dusíkovou atmosférou. Vlastní měřicí aparatura se skládala z pohyblivého stolku, držáku tranzistoru, který byl připevněn na pohyblivém stolku, joysticku, sloužícího k nastavování pozice stolku a upravování výšky jehlových elektrod, jehlových elektrod a mikroskopu zapojeného USB kabelem do počítače. Celá aparatura je zobrazena na obrázku 9.



**Obrázek 9** Aparatura použitá k charakterizaci tranzistoru

Další část měřicí aparatury byla tvořena dvěma Keithley přístroji (Keithley 6487 a Keithley 617) pro funkci Peltierových článků, osobním počítačem s programem naprogramovaným v LabVIEW.

#### 4.6.2. Postup charakterizace OFETu

Po napojení jehlových elektrod na příslušný pár elektrod tranzistoru bylo spuštěno měření v naprogramovaném programu LabVIEW. Nastavení napětí pro jednotlivá měření je zaznamenáno v tabulce 3.

**Tabulka 3** Nastavení měření v programu LabVIEW

Charakteristika	$V_{SD}$	Krok $V_{SD}$	$V_{GS}$	Krok $V_{GS}$
Výstupní	5 až – 60 V	0,5 V	0 až – 60 V	10 V
Převodová pro lineární oblast	– 15 V	$V_{SD}$ je konstantní	10 až – 100 V	0,5 V
Převodová pro saturační oblast	– 60 V	$V_{SD}$ je konstantní	10 až – 100 V	0,5 V

Čas mezi nastavením napětí a změřením proudu byl 500 ms.

Program měřil závislosti proudu mezi S a D elektrodou na napětí mezi S a D elektrodou – výstupní charakteristika. Po naměření výstupních charakteristik začal program automaticky měřit převodové charakteristiky, kdy byla měřena závislost proudu mezi S a D elektrodou v závislosti na napětí mezi S a G elektrodou za konstantního napětí mezi S a D elektrodou.

#### 4.6.3. Teploty měření tranzistoru

Po proměření výstupních a převodových charakteristik pro všech 16 tranzistorů byl tranzistor přenesen na varnou desku, kde byl vyhřát na následující teplotu. Vyhřívání probíhalo z důvodu získání závislosti pohyblivosti nosičů náboje na teplotě vyhřívání tranzistoru. Nejprve měření probíhalo za laboratorní teploty (25 °C), následně byla vyhřívací teplota zvýšena na 50 °C, 75 °C, 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C a 140 °C.

## 5. Vyhodnocení a výsledky

Nejprve byly na vrstvách připravených na podložních sklech změřeny pro každý materiál jejich tloušťky (výsledky profilometrie kapitola 5.1.). Poté na těchto podložních sklech byla provedena termická analýza všech zkoumaných materiálů – termogravimetrie a diferenční skenovací kalorimetrie (výsledky vypsány v kapitolách 5.2. a 5.3.).

Na závěr byly (tentokrát už na připravených tranzistorech) změřeny tranzistorové charakteristiky pro každý pár elektrod na každém tranzistoru. Tato měření byla provedena po vyhřátí na všechny zkoumané teploty (kapitola 4.6.3.). Výsledky měření tranzistorových charakteristik a jejich vyhodnocení jsou zaznamenány v kapitole 5.4. a jejich shrnutí je v kapitole 5.4.5.

### 5.1. Výsledky profilometrie

Metodou popsanou v kapitole 4.4.1. byly změřeny tloušťky vrstev na tenkých sklíčkách, které byly v případě vakuového napařování připraveny zároveň a v případě rotačního nanášení byly připraveny se stejným nastavením rotačního nanášече.

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 4.

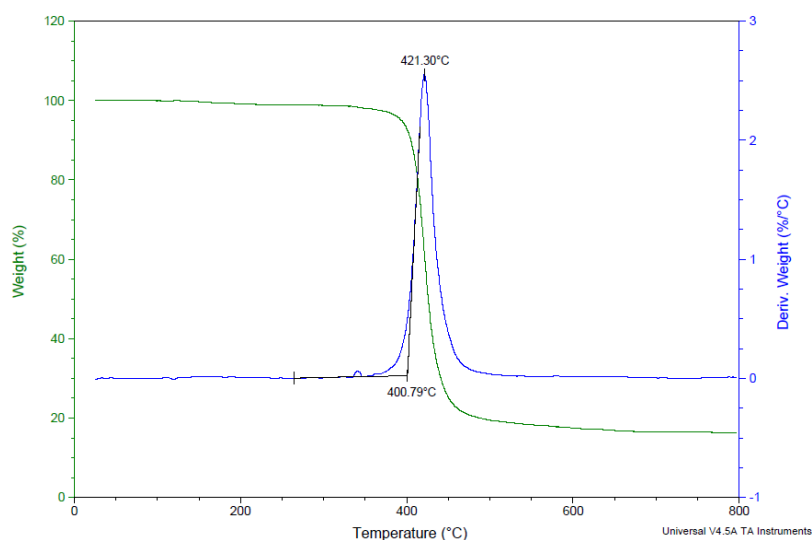
**Tabulka 4**     *Jednotlivé tloušťky připravených vrstev*

Materiál	$h \text{ [nm]} \pm 25 \text{ nm}$
DPP 132	151,6
DPP 138	420,3
DPP 174	200,9
DPP 178	188,8

Odchylka 25 nm je zde volena z důvodu různé homogenity vrstvy. Dále je vidět, že jsou tloušťky vrstev jednotlivých materiálů (zvláště pak tloušťka vrstvy z materiálu DPP 138). Tloušťka vrstvy ovšem nemá přímý vliv na pohyblivost nosičů náboje.

### 5.2. Výsledky termogravimetrie

Výsledkem termogravimetrického měření byla termogravimetrická křivka (obrázek 10). Výsledkem jsou informace o teplotě, při které dochází k degradaci, která může být pozorována jako úbytek hmotnosti – teplota ve vrcholu křivky zobrazeného na obrázku 10.



**Obrázek 10** Termogravimetrická křivka materiálu DPP 132

Tyto výsledné teploty degradace pro každý materiál jsou zobrazeny v tabulce 5.

**Tabulka 5** Teploty degradace pro jednotlivé materiály

Materiál	$t_{\text{degradace}} [^{\circ}\text{C}]$
DPP 132	421
DPP 138	419
DPP 174	418
DPP 178	423

Díky výsledným teplotám degradace pro jednotlivé materiály bylo ověřeno, že u ani jednoho ze zkoumaných materiálu během vyhřívání na zkoumané teploty nedošlo k degradaci (nejvyšší teplota vyhřívání byla 140 °C).

### 5.3. Výsledky diferenční skenovací kalorimetrie

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.3.2., DSC je metoda, díky které je možno zkoumat změny odehrávající se ve vrstvě při změnách teploty. Tyto informace jsou důležité pro určení, zda ke změnám pohyblivosti nosičů náboje dochází kvůli změnám ve struktuře vrstvy.

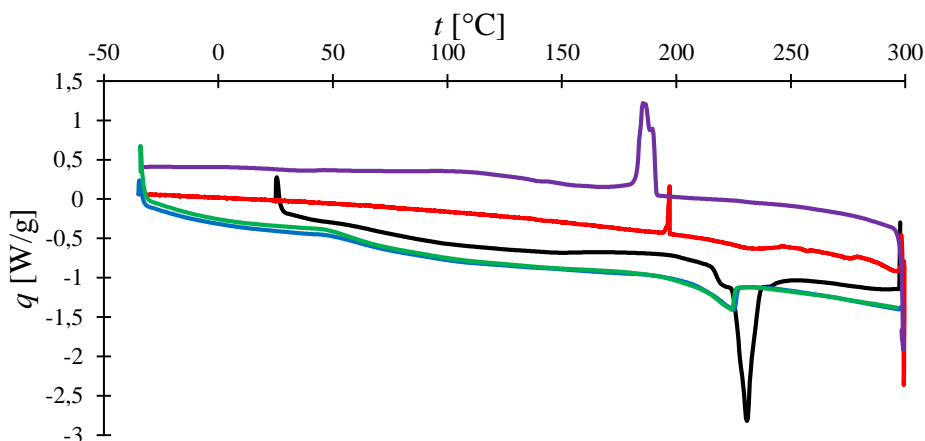
Měření probíhalo v pěti krocích. Nastavení měření je zobrazeno v tabulce 6.

**Tabulka 6** Nastavení teplot pro měření DSC

	$t_{\text{počáteční}} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{\text{konečná}} [^{\circ}\text{C}]$	Krok $t [^{\circ}\text{C}/\text{min}]$
1	25	300	10
2	300	-35	0,5
3	-35	300	10
4	300	-35	10
5	-35	300	10

#### 5.3.1. DPP 132

Výsledek DSC pro materiál DPP 132 je zobrazen na grafu 1.

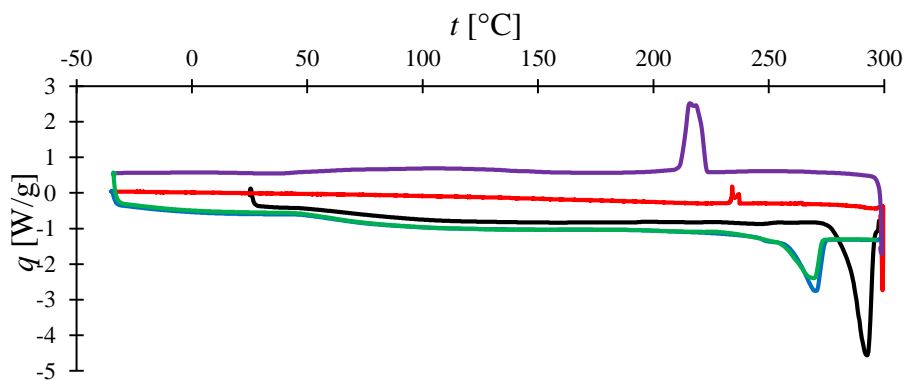


**Graf 1** Výsledek DSC pro materiál DPP 132

V první fázi (černá křivka) mezi 55 °C a 180 °C dochází k pozvolné relaxaci (při které dochází k přeuspořádání molekul). Následuje trojté snížení intenzity signálu značící tání od 215 °C do 225 °C, které je patrné kvůli třem izomeriím materiálu. Během prvního chlazení (červená křivka) dochází k pozvolné krystalizaci mezi 295 °C a 230 °C, která je následována ostrým zvýšením intenzity signálu značící krystalizaci při 194 °C. Toto zvýšení je následováno pozvolnou relaxací do – 35 °C. Druhá fáze ohřevu (modrá křivka) začíná pozvolnou relaxací od – 35 °C do 50 °C, která je následována další relaxací od 55 °C do 180 °C. Při teplotách od 200 °C do 230 °C je patrný jednoduché snížení intenzity signálu, které značí tání. Při následujícím chlazení (fialová křivka) je vidět pozvolné zvýšení intenzity signálu zobrazující krystalizaci při teplotě 192 °C – 180 °C. Následující pozvolná relaxace probíhá mezi 155 °C až 50 °C. Závěrečný ohřev (zelená křivka) má stejný průběh jako předchozí ohřev (modrá křivka).

### 5.3.2. DPP 138

Výsledek DSC měření pro DPP 138 je zobrazen na grafu 2.

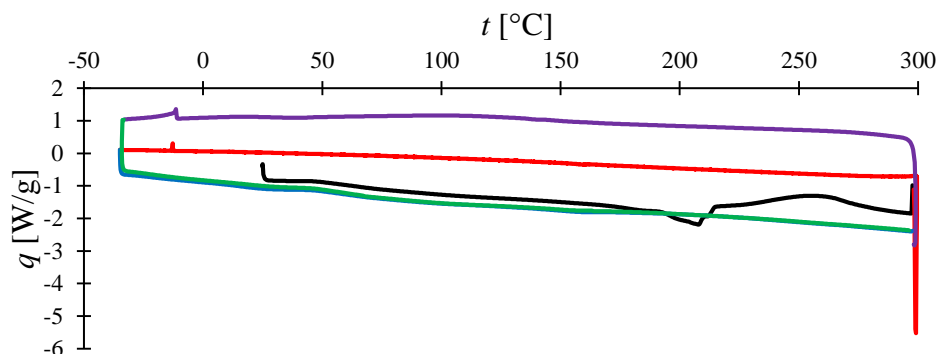


**Graf 2** Výsledek DSC pro materiál DPP 138

Průběh DSC charakteristiky pro DPP 138 byl velice podobný jako v případě materiálu DPP 132. Relaxace a přeuspořádání probíhaly při podobných teplotách. Rozdíl je patrný při prvním snížení intenzity signálu na černé křivce. Oproti DPP 132 se neskládá ze tří částí, ale jen z jedné. Kromě toho je viděn až při teplotách 270 °C až 300 °C. Při prvním chlazení (červená křivka) je pouze patrné zvýšení intenzity signálu (krystalizace) od 238 °C do 232 °C. Fáze druhého ohřevu

(modrá křivka) je podobně jako u DPP 132 tvořena dvěma po sobě navazujícími relaxacemi a přeuspořádáními (od  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a od  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a jednoduchým snížením intenzity signálu (tání), které probíhá od  $248\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $272\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Během poslední fáze chlazení (fialová křivka) je patrné pozvolné zvýšení intenzity signálu (kristalizace) od  $223\text{ }^{\circ}\text{C}$  po  $203\text{ }^{\circ}\text{C}$  a následující pozvolná relaxace a přeuspořádání od  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Finální ohřev (zelená křivka) je taktéž identická jako fáze druhého ohřevu (modrá křivka).

### 5.3.3. DPP 174

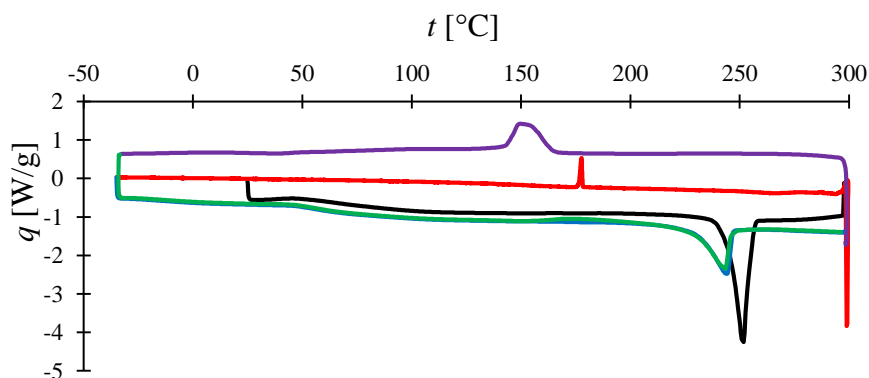


**Graf 3** Výsledek DSC pro materiál DPP 174

Data z DSC pro materiál DPP 174 jsou zobrazena na grafu 3. Počáteční ohřev začíná pozvolnou relaxací a přeuspořádáním molekul ve vrstvě. Následuje snížení intenzity signálu při tání od  $191\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při  $225\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$  dochází k degradaci (oxidaci) materiálu. Při následném chlazení dochází ke krystalizaci nebo artefaktu při  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Během druhého ohřívání jsou patrné dvě relaxace a přeuspořádání mezi teplotami  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Fialová křivka znázorňuje poslední chlazení, při kterém dochází k relaxaci a přeuspořádání materiálu. Poslední ohřev (zelená křivka) má stejný průběh jako druhý ohřev (modrá křivka). Z těchto výsledků je jasné, že vrstva tvořena materiálem DPP 174, která byla připravena vakuovým napařováním (kapitola 4.5.3.) nebyla funkční, protože materiál během přípravy degradoval.

### 5.3.4. DPP 178

Výsledky z měření DSC pro materiál DPP 178 jsou zobrazeny na grafu 4.



**Graf 4** Výsledek DSC pro materiál DPP 174

Při prvním ohřevu byla nejprve patrna relaxace a přeuspořádání materiálu při teplotě od 50 °C do 195 °C. Následovalo tání při teplotě 238 °C – 259 °C. Během prvního chlazení došlo ke krystalizaci od 180 °C do 175 °C. U druhého ohřevu jsou opět patrné dvě relaxace při – 35 °C až 45 °C a při 50 °C až 165 °C. Tání je patrné od 218 °C do 248 °C. Krystalizace je znatelná u posledního chlazení během teplot 166 °C až 142 °C. Průběh posledního ohřevu je stejný jako ohřev druhý.

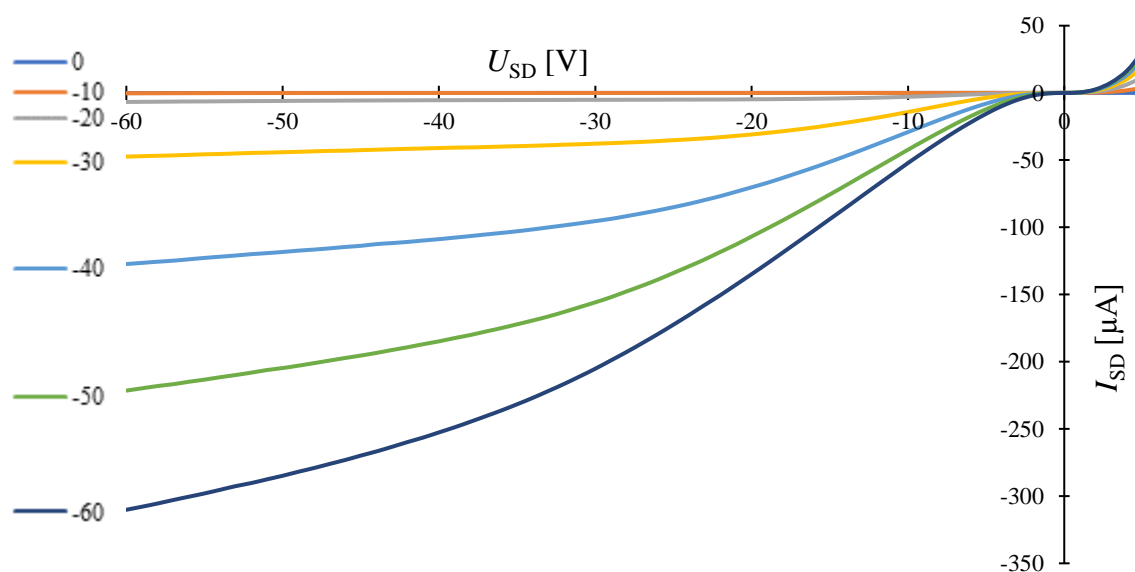
#### 5.4. Výsledky OFET charakterizace

Charakterizace OFETů byla prováděna z důvodu zjištění, který ze zkoumaných materiálů vykazuje nejlepší schopnost vést proud. Zároveň bylo provedeno měření při různých teplotách (kapitola 4.6.3.), aby bylo zjištěno, zda dochází se změnou teploty ke změně schopnosti vést proud. Díky tomu bylo zjištěno, který zkoumaný materiál je nejvhodnější polovodič a zároveň jaká ze zkoumaných teplot je nejvhodnější pro vyhřátí.

Charakterizace byla prováděna způsobem, jaký je popsán v kapitole 4.6. na aparatuře (kapitola 4.6.1.) s nastavením, které je popsáno v kapitole 4.6.2. Byly měřeny výstupní a k nim příslušné převodové charakteristiky, ze kterých byla následně vypočtena pohyblivost nosičů náboje.

##### 5.4.1. DPP 132

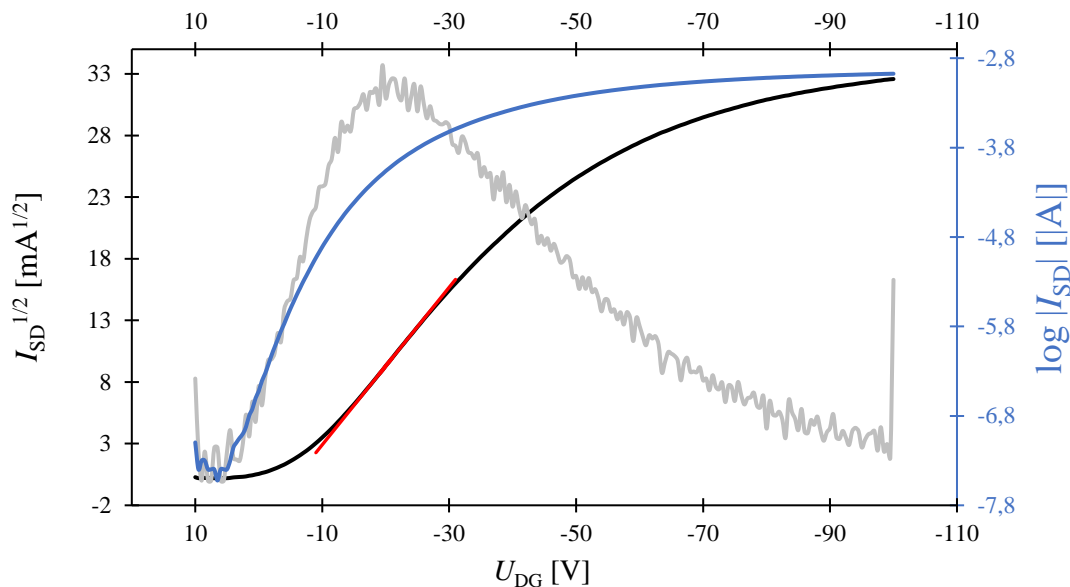
Jako příklad výstupní charakteristiky byla vybrána výstupní charakteristika naměřena při 50 °C na kanále 2,5 a (graf 5).



**Graf 5** Výstupní charakteristika DPP 132, při 50 °C, kanál 2,5 a

Vyhodnocení bylo provedeno ze saturační oblasti. Při napětí -50 V byla naměřena převodová charakteristika (graf 6). K této charakteristice byla v excelu sestavena její derivace. V bodě, kde tato derivace nabývá maxima, byla v původní charakteristice sestrojena regresní přímka dána bodem v maximu a dvěma dalšími nejbližšími body z obou stran.





**Graf 6** Převodová charakteristika DPP 132, při 50 °C, kanál 2,5 a

Jakmile je regresní přímka sestavena a připravena její rovnice, známe všechny hodnoty nutné pro výpočet pohyblivosti nosičů náboje. Výše vyobrazená výstupní a převodová charakteristika byla získána při měření tranzistoru s materiálem DPP 132, při 50 °C, s délkou kanálu 2,5 μm na pozici a. Pro výpočet pohyblivosti ze saturační oblasti použijeme rovnici 1. První člen rovnice je směrnice sestavené regresní křivky v  $A^{1/2} \cdot V^{-1}$ ,  $L$  je délka kanálu v cm,  $W$  je šířka kanálu v cm a  $C_i$  je kapacita dielektrika v  $F \cdot cm^{-2}$ . Hodnoty  $L$ ,  $W$ ,  $C_i$  jsou konstanty vycházející z parametrů substrátu, případně daného kanálu. Pohyblivost nosičů náboje je dána rovnicí

$$\mu_{sat} = \left( \frac{\partial I_{DS}^{1/2}}{\partial V_G} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot L}{W \cdot C_i} \quad (4).$$

Do rovnice bylo dosazeno: směrnice k regresní přímce má hodnotu  $-6,43 \cdot 10^{-4} A^{1/2} \cdot V^{-1}$ , délka kanálu ( $L$ ) má hodnotu  $2,5 \cdot 10^{-4}$  cm, šířka kanálu ( $W$ ) má hodnotu  $10 \cdot 10^{-1}$  cm a kapacita dielektrika ( $C_i$ ) má hodnotu  $1,5 \cdot 10^{-8} F \cdot cm^{-2}$ . Výsledná pohyblivost je potom rovna:

$$\mu_{sat} = 13,8 \cdot 10^{-3} cm^2 V^{-1} s^{-1} \quad (5).$$

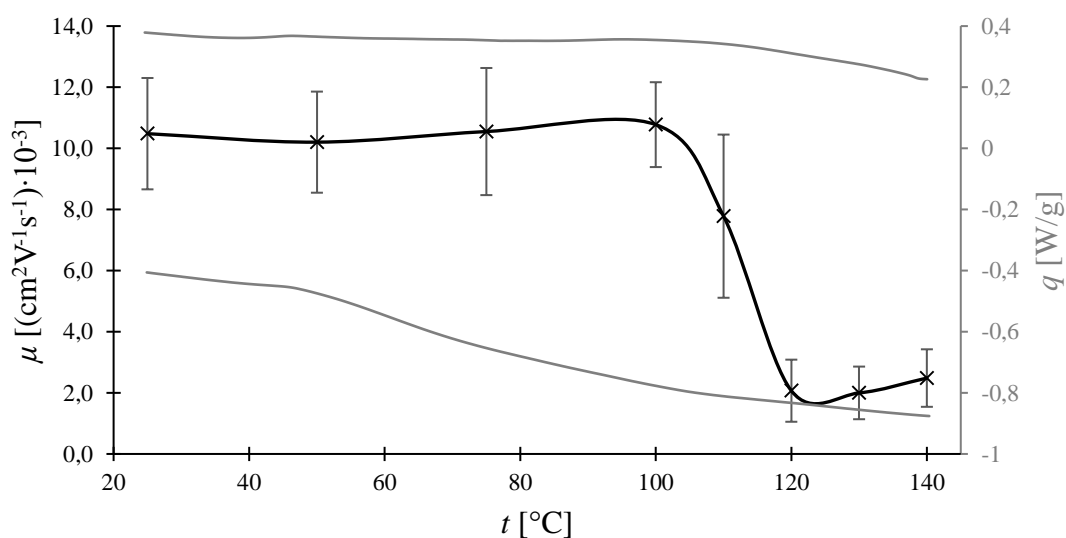
Stejným způsobem byly vypočteny pohyblivosti nosičů náboje pro všechny pozice na tranzistoru za všech teplot. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 7.

**Tabulka 7** Výsledné hodnoty pohyblivosti nosičů náboje pro DPP 132 (hodnoty označené hvězdičkou nebyly z důvodu přílišné odlehlosti započítány do výsledného průměru)

$L$ [μm]	Pozice	$t$ [°C]							
		25	50	75	100	110	120	130	140
		$\mu [(cm^2 V^{-1} s^{-1}) \cdot 10^{-3}]$							
2,5	a	8,7	13,8	18,8*	12,9	5,8	0,9	0,8	0,9
	b	7,7	10,0	13,8	14,0	7,5	1,9	2,0	3,6
	c	4,2*	17,2*	23,7*	12,2	8,7	0,9	1,1	1,0
	d	7,2	8,6	12,3	9,3	6,1	1,4	1,7	3,9
5	a	10,6	10,9	12,3	11,4	4,0	1,1	1,4	2,0
	b	10,1	10,3	11,0	10,1	5,2	1,2	1,1	1,8

5	c	10,6	10,3	12,5	9,1	3,0	1,0	1,1	1,5
	d	13,8	13,3	13,9	12,2	4,3	1,1	1,1	2,0
10	a	9,1	8,8	8,9	9,6	9,0	2,7	2,2	2,5
	b	10,1	9,6	9,6	10,3	10,0	2,6	2,4	2,5
	c	11,6	10,5	9,6	10,6	11,4	2,9	2,4	2,5
	d	9,6	8,8	8,8	9,6	9,0	2,2	2,1	2,3
20	a	12,4	7,4	9,4	10,3	9,6	3,0	2,7	2,8
	b	12,4	10,8	9,3	10,5	10,	3,5	3,3	3,3
	c	11,8	10,1	9,3	10,2	10,8*	3,7	3,5	3,7
	d	11,4	9,8	7,1	10,1	10,1	3,2	3,2	3,4
Průměr 2,5		7,9	10,8	13,1	12,1	7,0	1,2	1,4	2,3
Průměr 5		11,3	11,2	12,4	10,7	4,1	1,1	1,2	1,8
Průměr 10		10,1	9,4	9,2	10,0	9,8	2,6	2,3	2,4
Průměr 20		12,0	9,5	8,8	10,3	10,1	3,3	3,2	3,3
Celkový průměr		10,5	10,2	10,5	10,8	7,8	2,1	2,0	2,5
Směrodatná odchylka		1,8	1,7	2,1	1,4	2,7	1,0	0,9	0,9

Výsledné průměry se směrodatnými odchylkami pro každou teplotu byly vyneseny do grafu 7. Zároveň byla do grafu vynesena také část DSC křivky prvního cyklu, která byla naměřena při stejných teplotách jako byla měřena pohyblivost nosičů náboje. Tak bylo učiněno z důvodu zjištění, zda ke změnám pohyblivosti dochází v důsledku přeuspořádání molekul ve vrstvě nebo ne.



**Graf 7** Závislost pohyblivosti nosičů náboje na teplotě spolu s odpovídajícími částmi DSC křivek pro DPP 132

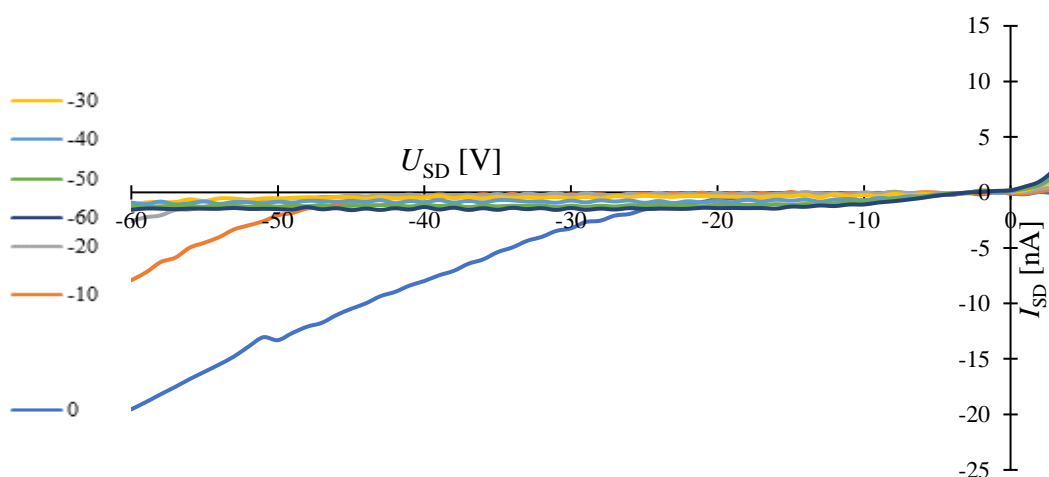
Z grafu je vidět, že průměrná pohyblivost nosičů náboje se během teplot 25 °C a 100 °C příliš neměnila – pohybovala se v rozmezí 10, 8 a 10, 2 · 10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>. Poté následoval postupný propad na 2, 1 · 10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>, a poté se opět pohyblivost příliš neměnila.

Ze spodní DSC křivky (úsek od 25 °C do 140 °C z modré křivky grafu 1) značí ohřev je patrné že ve sledovaném rozmezí teplot dochází k pozvolné relaxaci a přeuspořádání

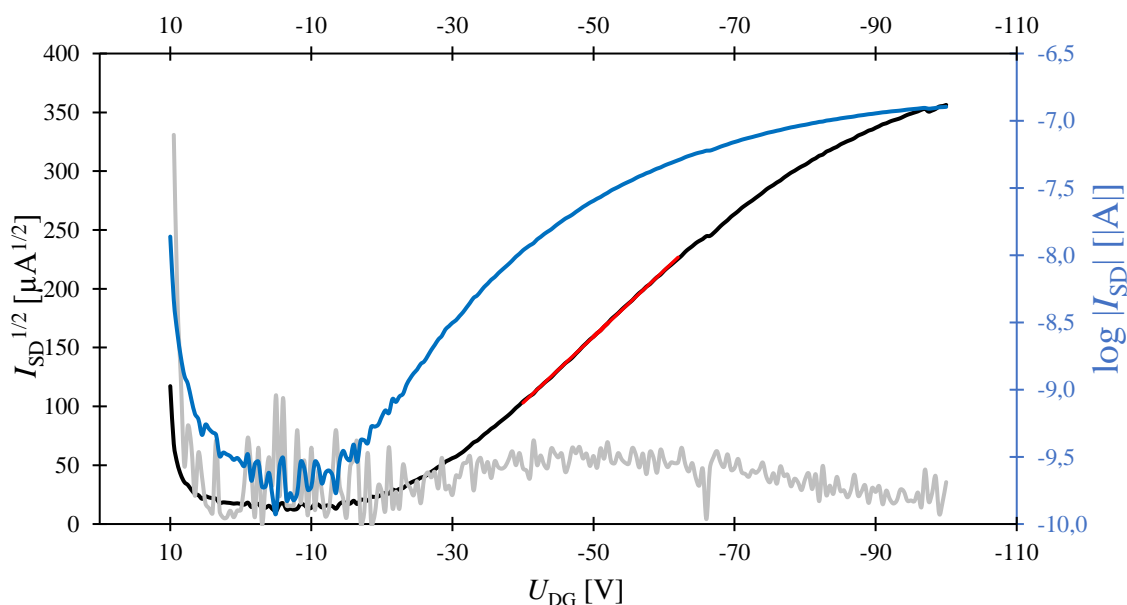
molekul. Stejně tomu je u horní DSC křivky značící chlazení (úsek od 25 °C do 140 °C z fialové křivky grafu 1).

#### 5.4.2. DPP 138

Stejným způsobem jako u DPP 132 byly vyhodnoceny také pohyblivosti nosičů náboje u DPP 138. Všechny vypočtené hodnoty pohyblivosti jsou zobrazeny v tabulce 3. Příklad výstupní charakteristiky DPP 138 byl naměřen při teplotě 75 °C na kanále 2,5 a (graf 8). K němu naměřená převodová charakteristika s derivací je zobrazena na grafu 9



**Graf 8** Výstupní charakteristika DPP 138, při 75 °C, kanál 2,5 a



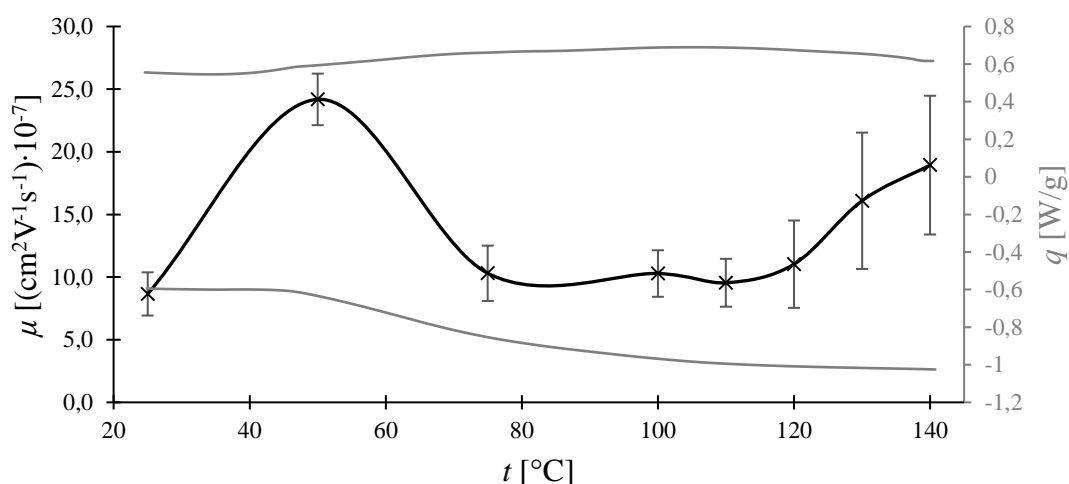
**Graf 9** Převodová charakteristika DPP 138; 75 °C; 2,5 a

Po naměření všech výstupních a převodových charakteristik bylo provedeno vyhodnocení (stejným způsobem, jako je naznačeno v kapitole 5.4.1.). Všechny vypočtené pohyblivosti nosičů náboje byly vyneseny do tabulky 8.

Z vypočtených průměrných hodnot pohyblivostí nosičů náboje byl sestrojen graf (graf 10) v závislosti na teplotě. Stejně jako v případě DPP 132 byla do grafu 7 vynesena odpovídající část DSC křivky pro materiál DPP 138.

**Tabulka 8** Výsledné hodnoty pohyblivostí nosičů náboje pro DPP 138 (hodnoty označeny hvězdičkou nebyly z důvodu přílišné odlehlosti započítány do výsledného průměru)

L [ $\mu\text{m}$ ]	Pozice	t [ $^{\circ}\text{C}$ ]							
		25	50	75	100	110	120	130	140
		$\mu [(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}) \cdot 10^{-7}]$							
2,5	a	-	22,7	10,6	10,5	12,8	-	50,7*	79,4*
	b	7,1	16,1*	9,8	8,5	9,5	-	38,0*	64,0*
	c	5,4	24,6	12,1	13,5	17,0*	-	50,2*	80,4*
	d	4,7*	13,3*	9,3	7,3	8,3	-	35,2*	62,7*
5	a	9,8	17,0*	7,3	6,5*	8,9	-	21,9	27,8
	b	10,2	21,8	6,6	5,9*	4,9*	9,5	9,9	15,6
	c	7,6	25,6	11,5	10,8	10,4	-	29,0	-
	d	9,9	17,9*	8,5	11,9	10,3	-	17,1	29,4
10	a	9,7	23,7	11,8	11,4	-	14,0	14,1	18,0
	b	16,2*	27,7	15,1*	9,3	-	15,1	13,9	23,7
	c	15,8*	22,1	9,3	7,4	21,4*	10,9	15,0	16,1
	d	9,5	26,6	9,7	10,8	6,7	11,2	-	17,7
20	a	-	24,3	14,7	19,2*	-	6,1	12,2	16,4
	b	-	21,4	9,8	11,4	-	7,2	12,4	14,1
	c	-	-	13,2	10,7	-	16,2	18,7	16,9
	d	-	25,5	15,4*	4,7*	-	9,1	12,8	12,6
Průměr 2,5		6,3	23,7	10,5	9,9	10,2	-	43,5	71,6
Průměr 5		9,4	23,7	8,5	11,4	9,9	9,5	19,5	24,3
Průměr 10		9,6	25,0	10,3	9,7	6,7	12,8	14,3	18,9
Průměr 20		-	23,7	12,6	11,1	-	9,6	19,8	15,0
Celkový průměr		8,7	24,2	10,3	10,3	9,5	11,0	16,1	18,9
Směrodatná odchylka		1,7	2,1	2,2	1,9	1,9	3,5	5,4	5,5



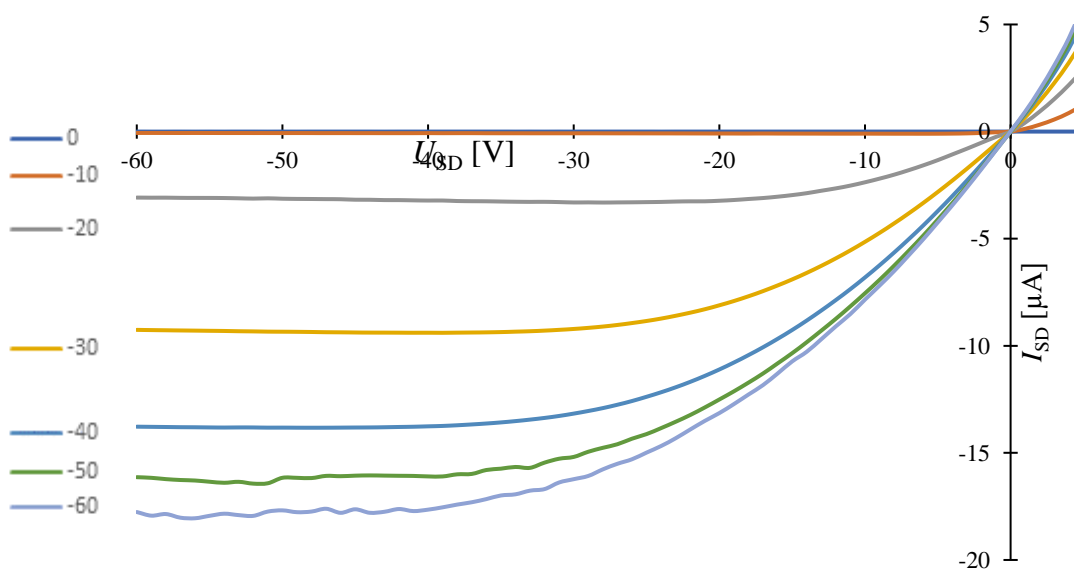
**Graf 10** *Závislost pohyblivosti nosičů náboje na teplotě spolu s odpovídající částí DSC křivky pro DPP 138*

Z grafu je vidět, že s výjimkou průměrné pohyblivosti nosičů náboje naměřené při 50 °C a závěrečného vzrůstu pohyblivosti při teplotě 130 °C a 140 °C jsou pohyblivosti nosičů náboje téměř konstantní.

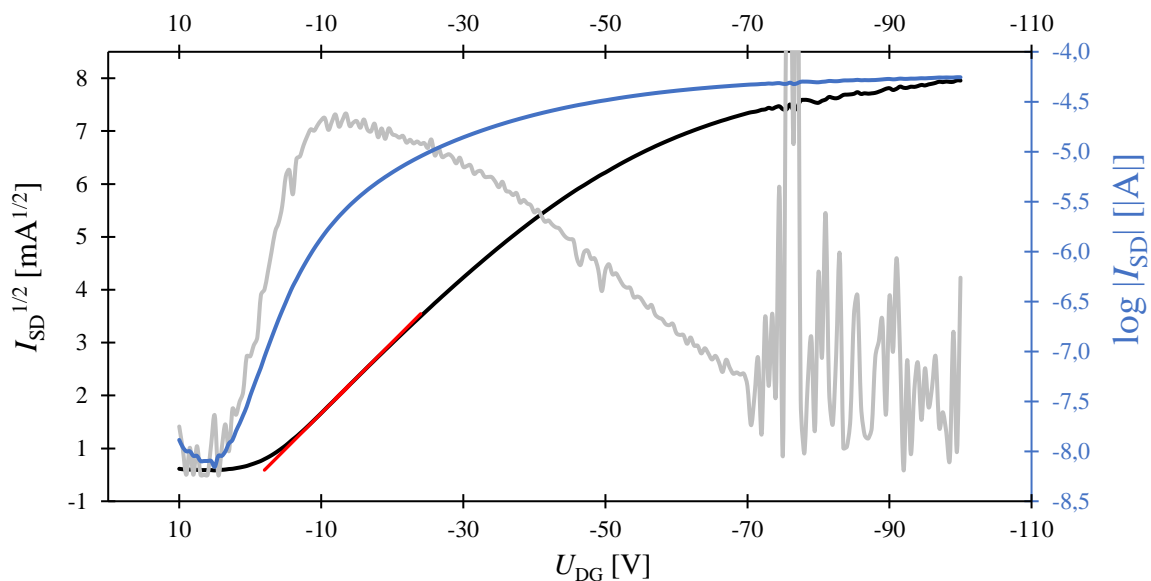
Ze spodní DSC křivky (úsek od 25 °C do 140 °C z modré křivky grafu 2) značí ohřev je patrné že ve sledovaném rozmezí teplot dochází k pozvolné relaxaci a přeuspořádání molekul. Relaxace a přeuspořádání u horní DSC křivky značí chlazení (úsek od 25 °C do 140 °C z fialové křivky grafu 1) je mírnější než při ohřevu.

#### 5.4.3. DPP 174

Podobně jako v předchozích případech, výpočty pohyblivosti nosičů náboje u DPP 174 byly provedeny ze saturační oblasti. Pro ukázkou byla vybrána výstupní (graf 11) a převodová (graf 12) charakteristika, která byla naměřena při teplotě 75 °C na pozici 20 b.



**Graf 11** *Výstupní charakteristika DPP 174; 75 °C; 20 b*



**Graf 12** Převodová charakteristika DPP 174; 75 °C; 20 b

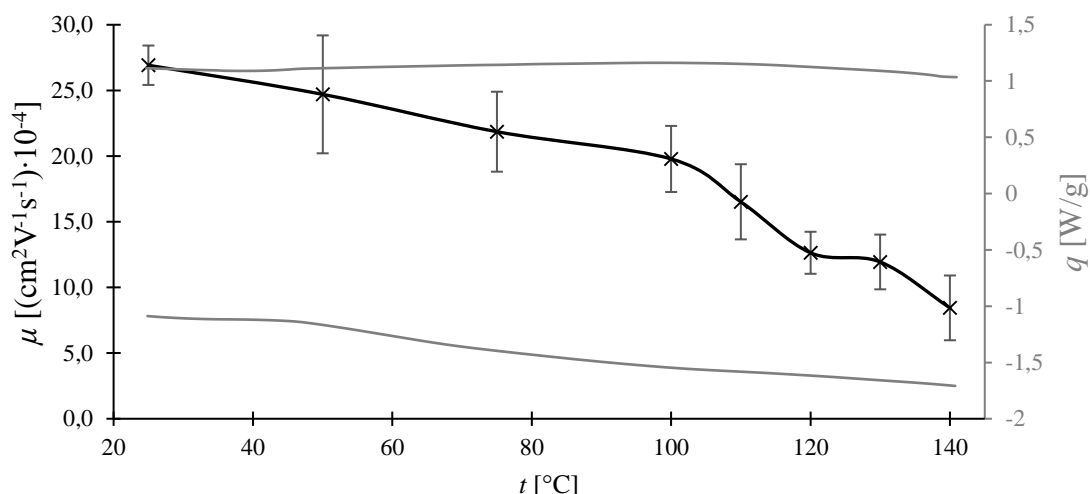
Výsledné vypočtené hodnoty všech pohyblivostí (vyhodnocení je uvedeno v kapitole 5.4.1.) pro DPP 174 byly vyneseny do tabulky 9.

Z vypočtených průměrných hodnot pohyblivostí nosičů náboje byl sestrojen graf (graf 13) v závislosti na teplotě. Stejně jako v předchozích případech byla do grafu 13 vynesena odpovídající část DSC křivky pro materiál DPP 174.

**Tabulka 9** Výsledné hodnoty pohyblivostí nosičů náboje pro DPP 174 (hodnoty označeny hvězdičkou nebyly z důvodu přílišné odlehlosti započítány do výsledného průměru)

$L$ [ $\mu\text{m}$ ]	Pozice kanálu	$t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]							
		25	50	75	100	110	120	130	140
		$\mu$ [ $(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}) \cdot 10^{-4}$ ]							
2,5	a	53,8*	29,7	25,5	22,4	19,2	15,2	14,3	10,7
	b	27,5	27,8	26,4	22,9	19,4	18,1*	14,1	10,4
	c	25,5	28,8	24,3	22,8	19,5	15,2	13,6	9,2
	d	35,8*	33,6	27,4	24,9	22,7	18,3*	15,4	11,3
5	a	15,9*	15,8	17,6	17,3	17,7	13,3	11,3	9,5
	b	27,0	28,1	22,8	20,9	17,7	14,7	13,1	9,5
	c	32,4*	28,9	22,6	21,0	16,9	13,0	12,8	13,2
	d	23,8	24,0	22,6	20,6	17,4	6,8*	14,5	11,0
10	a	29,0	21,2	20,5	18,6	13,7	12,2	11,8	7,7
	b	25,4	20,5	18,2	17,0	12,8	12,2	10,3	6,4
	c	28,0	21,9	18,2	17,4	14,6	12,5	10,5	6,2
	d	27,8	21,0	19,0	17,7	16,0	11,4	11,6	7,2
20	a	28,6	23,2	22,3	20,0	16,6	11,6	9,7	5,6
	b	27,7	25,1	20,4	18,4	12,	11,7	9,8	5,9
	c	26,4	21,9	22,9	17,4	14,1	10,0	8,6	5,2

	d	26,3	23,7	19,0	17,2	13,2	11,3	9,7	6,2
Průměr 2,5		26,5	30,0	25,9	23,3	20,2	15,2	14,4	10,4
Průměr 5		25,4	24,2	21,4	20,0	17,4	13,7	12,9	10,8
Průměr 10		27,6	21,2	19,0	17,7	14,3	12,1	11,1	6,9
Průměr 20		27,3	23,5	21,2	18,3	14,2	11,1	9,4	5,7
Celkový průměr		26,9	24,7	21,9	19,8	16,5	12,6	11,9	8,4
Směrodatná odchylka		1,5	4,5	3,0	2,5	2,9	1,6	2,1	2,5



**Graf 13** *Závislost pohyblivosti nosičů náboje na teplotě spolu s odpovídající částí DSC křivky pro DPP 174*

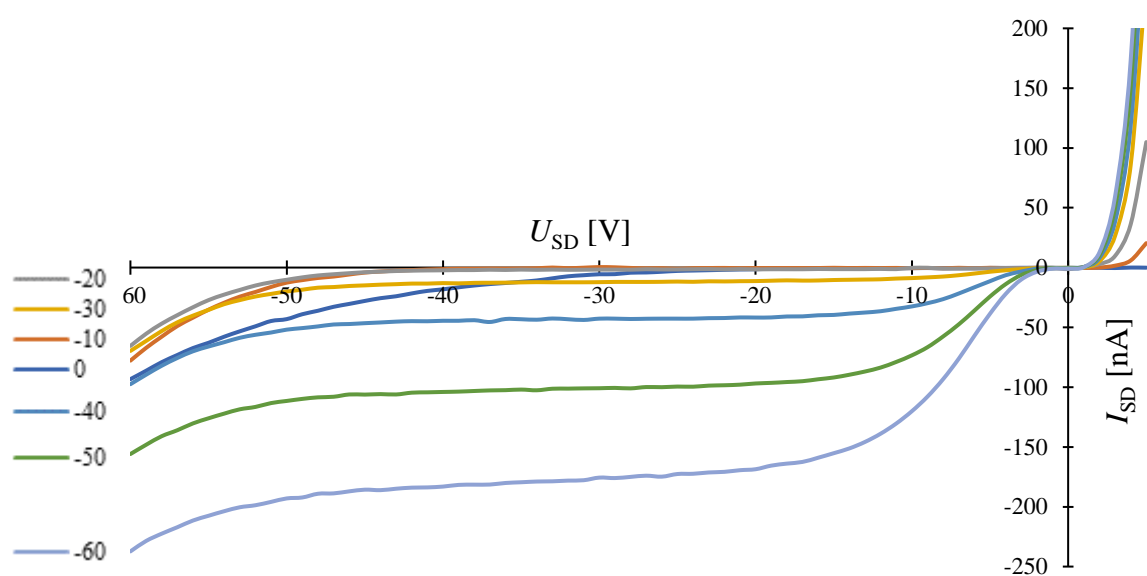
Jak vyplývá z grafu 9, hodnoty průměrných pohyblivostí nosičů náboje mají postupně klesající trend – z původních  $26,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  na konečných  $8,4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

Z dolní DSC křivky (ohřev) je patrná pozvolná relaxace a přeuspořádávání molekul. U horní křivky (chlazení) dochází k relaxaci a přeuspořádání molekul mezi 25 °C a 60 °C.

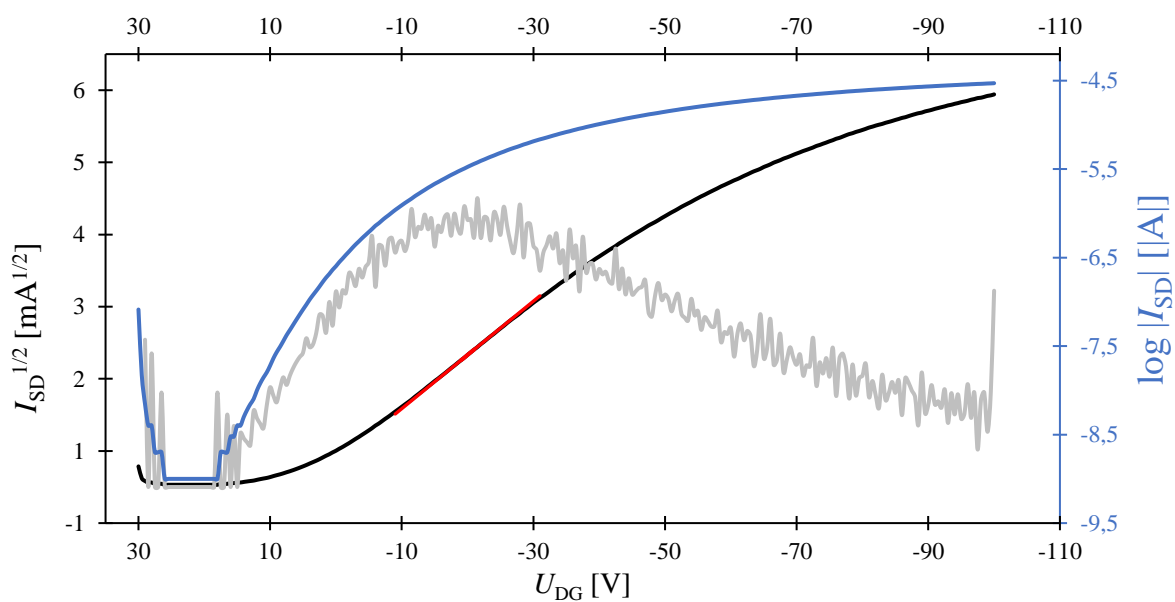
#### 5.4.4. DPP 178

Tak jako u předchozích tranzistorů byly hodnoty pohyblivostí nosičů náboje vypočteny ze saturačních oblastí. Pro ukázkou byla vybrána výstupní (graf 14) a převodová (graf 15) charakteristika, které byly naměřeny u kanálu 2,5 a při teplotě 100 °C.

Způsobem, který byl nastíněn v kapitole 5.4.1., byly vypočteny jednotlivé hodnoty pohyblivostí nosičů náboje pro všechny kanály za všech měřených teplot. Tyto hodnoty jsou zaznačeny v tabulce 10.



**Graf 14** Výstupní charakteristika DPP 178; 100 °C; 2,5 a



**Graf 15** Převodová charakteristika DPP 178; 100 °C; 2,5 a

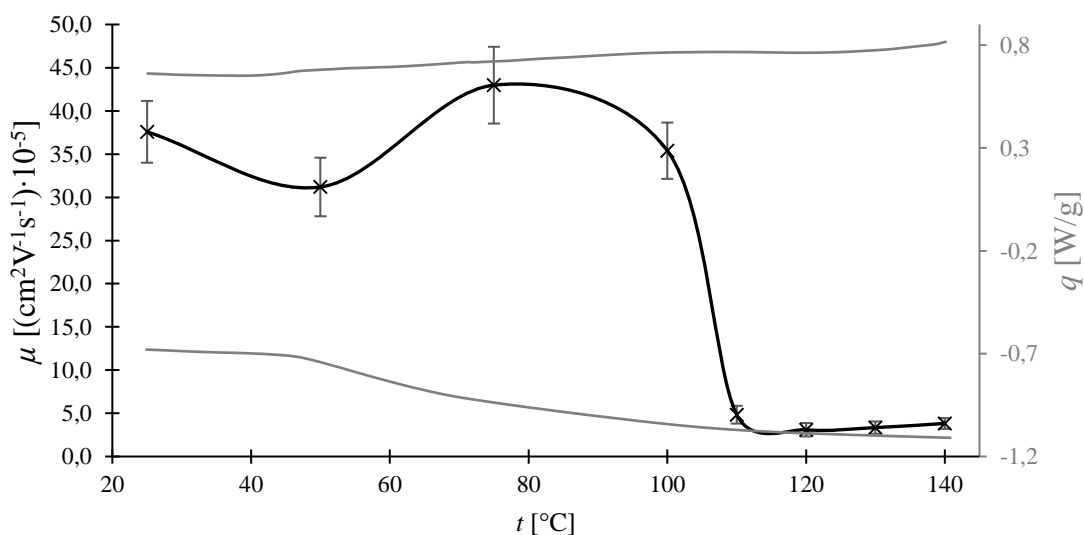
**Tabulka 10** Výsledné hodnoty pohyblivosti nosičů náboje pro DPP 178

$L$ [ $\mu\text{m}$ ]	Pozice kanálu	$t$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]							
		25	50	75	100	110	120	130	140
		$\mu$ [ $(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}) \cdot 10^{-5}$ ]							
2,5	a	35,5	29,1	20,7*	18,5*	4,3	2,7	2,3	3,9
	b	36,4	30,0	21,1*	29,5	6,3	2,9	2,5	3,9
	c	49,2*	40,4*	28,5*	36,9	9,0*	4,1	4,2	6,7*



	d	45,6	37,2	39,9	36,9	8,1*	4,7	3,8	5,9*
5	a	34,8	30,4	46,6	30,4	3,8	2,0	2,2	2,8
	b	39,7	34,9	23,3*	33,3	5,5	2,8	3,7	4,8
	c	37,2	32,6	39,3	-	-	-	-	-
	d	36,7	32,0	36,6	38,2	5,8	2,5	3,5	4,3
10	a	38,1	31,2	47,1	34,1	4,3	2,9	3,5	3,9
	b	40,9	33,2	53,9*	34,6	6,9	2,9	3,6	3,9
	c	40,6	35,8	48,4	38,9	5,2	3,0	4,5	3,2
	d	41,4	33,0	48,1	34,5	5,0	2,5	2,9	-
20	a	31,8	26,4	42,1	39,9	4,2	3,3	3,7	-
	b	37,2	29,4	43,9	44,6*	4,1	4,6	4,2	-
	c	34,1	26,8	37,8	46,1*	4,2	3,2	3,0	-
	d	33,7	25,9	26,8*	37,5	3,4	2,5	2,7	-
Průměr 2,5		39,2	32,1	39,9	34,4	5,3	3,6	3,2	3,9
Průměr 5		37,1	32,5	40,8	34,0	5,0	2,4	3,1	3,9
Průměr 10		40,3	33,3	47,9	35,5	5,3	2,8	3,6	3,7
Průměr 20		34,2	27,1	41,3	38,7	4,0	3,4	3,4	-
Celkový průměr		37,6	31,2	43,0	35,4	4,8	3,1	3,3	3,8
Směrodatná odchylka		3,6	3,4	4,4	3,3	1,0	0,8	0,7	0,6

Z vypočtených průměrných hodnot pohyblivostí nosičů náboje byl sestrojen graf (graf 16) v závislosti na teplotě. Stejně jako v předchozích případech byla do grafu 16 vynesena odpovídající část DSC křivky pro materiál DPP 178.



**Graf 16** Závislost pohyblivosti nosičů náboje na teplotě spolu s odpovídající částí DSC křivky pro DPP 178

Obdobně jako tomu bylo u materiálu DPP 132, můžeme u DPP 178 pozorovat razantní propad hodnot pohyblivostí nosičů náboje. V tomto případě propad nastal mezi teplotami 100 a 110 °C, a to u všech délek kanálů podobně. Po propadu hodnot pohyblivostí nosičů náboje jsou opět průměrné pohyblivosti nosičů nábojů téměř konstantní.

Při ohřevu u DSC (dolní DSC křivka) dochází k pozvolné relaxaci a přeuspořádání molekul. U horní křivky (chlazení) k relaxaci nedochází.

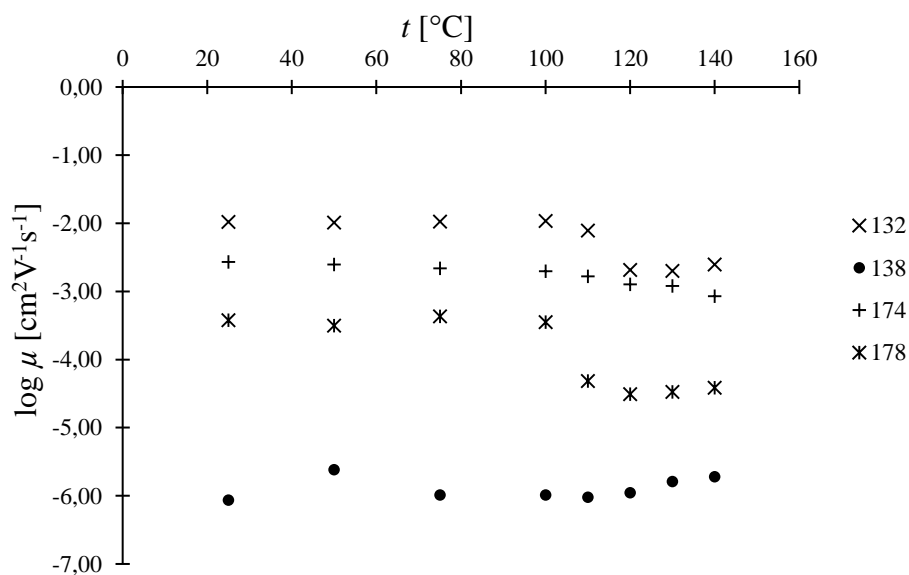
#### 5.4.5. Shrnutí

Po vyhodnocení všech naměřených dat pro každý materiál bylo provedeno celkové srovnání. K tomuto účelu byly použity výsledné průměry pohyblivostí nosičů náboje, které byly pro každý materiál vypočteny po vyloučení odlehlých hodnot. Výsledné průměry byly vyneseny do tabulky 11.

**Tabulka 11** Výsledné zlogaritmované průměry pohyblivostí nosičů náboje pro každý materiál v závislosti na teplotě

Materiál	$t [^{\circ}\text{C}]$							
	25	50	75	100	110	120	130	140
	$\log \mu [\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}]$							
DPP 132	-1,98	-1,99	-1,98	-1,97	-2,11	-2,68	-2,70	-2,61
DPP 138	-6,06	-5,62	-5,99	-5,99	-6,02	-5,96	-5,79	-5,72
DPP 174	-2,57	-2,61	-2,66	-2,70	-2,78	-2,90	-2,92	-3,07
DPP 178	-3,43	-3,51	-3,37	-3,45	-4,31	-4,51	-4,48	-4,42

Pro lepší názornost byl sestrojen graf (graf 17) zobrazující závislost průměrných hodnot pohyblivostí zobrazených v tabulce 8 na teplotě.



**Graf 17** Výsledné průměry pohyblivostí nosičů náboje pro každý materiál v závislosti na teplotě

Z grafu je zřejmé, že ze sledovaných materiálů jsou nejvyšší pohyblivosti nosičů náboje u materiálu DPP 132. Při vyšších teplotách jsou vlastnosti pohyblivosti nosičů náboje u materiálů DPP 132 a DPP 174 velice podobné, protože u DPP 174 nebyl sledován při teplotách v rozmezí 110 a 120 °C tak razantní propad pohyblivosti, jako u DPP 132. Nižší hodnoty pohyblivosti nosičů náboje byly zaznamenány u materiálu DPP 178 a nejnižší hodnoty byly naměřeny u materiálu DPP 138.

S výjimkou materiálu DPP 138, jehož hodnoty pohyblivosti jsou s rostoucí teplotou téměř konstantní, z uvedených měření vyplývá, že pohyblivost nosičů náboje u měřených materiálů byla nejprve téměř konstantní, po dosažení teploty 100 – 110 °C nastal propad těchto hodnot.

## 6. Závěr

Tato práce se zabývá charakterizací organických polovodivých materiálů pomocí termogravimetrie, diferenční skenovací kalorimetrie a charakterizací organických tranzistorů řízeného polem (OFET).

Metody termické analýzy (TG a DSC) byly voleny pro zjištění změn v materiálech za měnící se teploty. Z výstupů termogravimetrie byly zjištěny teploty degradací, díky kterým bylo ověřeno, že ani jeden ze zkoumaných materiálů během vyhřívání nepodléhá degradaci. Z výsledků diferenční skenovací kalorimetrie bylo zjištěno, při jakých teplotách dochází k přeuspořádání molekul a kdy dochází k tání a krystalizaci daného materiálu. Tato zjištění byla zásadní pro porovnání, zda dané změny mají vliv na změnu pohyblivosti nosičů náboje.

OFET charakterizace probíhala měřením výstupních a převodových charakteristik daného tranzistoru, ze kterých byla následně vypočtena pohyblivost nosičů náboje. Pro zjištění podmínek, za jakých je daný materiál nejvhodnější k polovodivým aplikacím, bylo voleno měření výstupních a převodových charakteristik po vyhřátí tranzistoru na různé teploty. Z těchto měření byly následně pro každý materiál vytvořeny závislosti pohyblivosti nosičů náboje na teplotě. Výsledkem OFET charakterizací bylo zjištěno, že nejvhodnější ze zkoumaných teplot byla teplota 100 °C, protože u většiny materiálů (s výjimkou DPP 138) byla při této teplotě naměřena nejvyšší mobilita.

Celkově bylo zjištěno, že největší vliv na pohyblivost nosičů náboje není teplota, jejíž změny mají vliv na pohyblivost jenom v rámci měření daného materiálu, ale samotná molekulová struktura, protože rozdíly mezi pohyblivostmi jednotlivých materiálů jsou daleko větší než mezi pohyblivostmi měřenými za různých teplot. Z měření vyplívá, že nejvyšší pohyblivosti byly naměřeny u materiálu DPP 132, na pomyslném druhém místě byly pohyblivosti naměřené u materiálu DPP 174. Třetí nejvyšší pohyblivosti byly zjištěny u materiálu DPP 178 a nejnižší pohyblivosti byly změřeny u materiálu DPP 138, u kterého navíc změny teplot neměly téměř žádný vliv na změnu pohyblivosti na rozdíl od ostatních materiálů.

## 7. Seznam zkratek

HOMO – highest occupied molecular orbital (nejvyšší obsazený molekulový orbital)  
LUMO – lowest unoccupied molecular orbital (nejnižší neobsazený molekulový orbital)  
eV – elektronvolt  
OFET – organic field effect tranzistor (organický tranzistor řízený polem)  
S, D, G – source, drain, gate elektrody (zdrojová, odtoková, řídicí)  
TFT – thin film tranzistor (tenkovrstvý tranzistor)  
FET – field effect tranzistor (tranzistor řízený polem)  
TCQN – tetrakyanochinodimetan  
DPP – diketopyrolopyrol  
OECT – organic electrochemical tranzistor (organický elektrochemický tranzistor)  
OTS – octadecyltrichlorsilan  
PFBT – poly-fluorenbenzothiadiazol  
TG – termogravimetrie  
DSC – diferenční skenovací kalorimetrie  
PTFE – polytetrafluoretylen  
ITO – oxid india a cínu

## 8. Zdroje

- [1] HAUFF, Elizabeth von. Field effect investigations of charge carrier transport in organic semiconductors. Oldenburg, 2005. Dizertační práce. Universitat Oldenburg. Vedoucí práce Carl von Ossietzky.
- [2] ED. BY WOLFGANG BRÜTTING. *Physics of organic semiconductors*. 2. repr. Weinheim: Wiley-VCH-Verl, 2005. ISBN 978-352-7405-503.
- [3] HEEGER, Alan, Steven KIVELSON, John SCHRIEFFER a Wu-Pei SU. Solitons in conducting polymers. 1998.
- [4] KOČER, M. Organické polovodiče a součástky [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2011.
- [5] OHRT, Christian; PREUSSE, Thomas. Organic semiconductors. University of Kiel, Germany
- [6] ČERMAK, Michal. Stárnutí vodivých polymerů. Plzeň, 2010. Bakalářská práce. Západočeská univerzita, FEL, KET. Vedoucí práce Tomáš Džugan.
- [7] ŘIHÁK, Pavel. Základní vlastnosti polovodičových materiálů. Brno, 2010. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Špinka.
- [8] MOORE, Donald G., Goverdhan METHA a SIEGAL. Attempted reformatkii reaction of benzonitrile, 1,4-diketo-3,6-diphenylpyrrolo[3,4-C]pyrrole. A lactam analogue of pentalene. *Tetrahedron Letters* [online]. 1974, č. 29 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040403901932022>
- [9] KLAUK, Hagen. Organic thin-film transistors. *Chemical Society Reviews*. 2010, 39(7), 2643-. DOI: 10.1039/b909902f. ISSN 0306-0012. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=b909902f>
- [10] HASEGAWA, Tatsuo a Jun TAKEYA. DOI: 10.1088/1468-6996/10/2/024314. ISBN 10.1088/1468-6996/10/2/024314.
- [11] FAULKNER, E. B. a R. J. SCHWARZ. *High performance pigments*. Weinheim: Wiley-VCH, c2009. ISBN 978-3-527-31405-8.
- [12] The synthesis, absorption and fluorescence of polardiketo-pyrrolo-pyrroles. *ScienceDirect: Dyes and Pigments* [online]. 2008, č. 2 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143720808002271>
- [13] HONOVÁ, Jana. *Studium vztahu mezi strukturou a vlastnostmi derivátů diketopyrrolopyrolů*. Brno, 2011. Diplomová práce. FCH VUT v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Martin Weiter, Ph.D
- [14] SURARU, Ute ZSCHIESCHANG a Frank WÜRTNER. Diketopyrrolopyrrole as pchannel organic semiconductor for high performance OTFTs. *The Royal Society of Chemistry* [online]. 2011, č. 1 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.rsc.org/suppdata/CC/C0/C0CC04395H/C0CC04395H.PDF>
- [15] Tranzistory řízené elektrickým polem. RS components [online]. 2005 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: [http://z-moravec.net/ext\\_el/tranz/fet.php](http://z-moravec.net/ext_el/tranz/fet.php)
- [16] SIRRINGHAUS, H. *Device Physics of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors*. DOI: 10.1002/adma.200501152. ISBN 10.1002/adma.200501152.
- [17] LIN, Peng a Feng YAN. Organic Thin-Film Transistors for Chemical and Biological Sensing. DOI: 10.1002/adma.201103334. ISBN 10.1002/adma.201103334. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201103334>
- [18] SALLEO, A., M. L. CHABINYC, M. S. YANG a R. A. STREET. Polymer thin-film transistors with chemically modified dielectric interfaces. DOI: 10.1063/1.1527691. ISBN 10.1063/1.1527691. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1527691>

- [19] IPMS. End-of-Line test substrates for customized Organic Semiconductors [online]. Dresden [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/common/products/COMEDD/ofet-e.pdf>
- [20] STRÍTESKÝ, Stanislav. *Elektrické transportní vlastnosti materiálů pro organickou elektroniku*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. Vedoucí práce Mgr. RADEK PŘIKRYL, Ph.D.
- [21] ROSICKÝ. Termická analýza. UK, Praha, 1989
- [22] ZERNEROVÁ, Alena. DSC analýza léčiv. Hradec Králové, 2006. Diplomová práce. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE FARMACEUTICKÁ FAKULTA V HRADCI KRÁLOVÉ.
- [23] COROPCEANU, Veaceslav, Jérôme CORNIL, Demetrio A. DA SILVA FILHO, Yoann OLIVIER, Robert SILBEY a Jean-Luc BRÉDAS. Charge Transport in Organic Semiconductors. *Chemical Reviews*. 2007, **107**(4), 926-952. DOI: 10.1021/cr050140x. ISSN 0009-2665. Dostupné také z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr050140x>